

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXIX

SEPTIEMBRE DE 2005

NÚMERO 112

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DÍAZ-PIEDRAHITA



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Botánica [Botany]		populations of the Nile Tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> (Teleostei: Cichlidae) in northern Colombia]. <i>Juan Carlos Narváez B., Arturo Acero P. & Jacobo Blanco R.</i>	383
- Estudios en Labiatae de Colombia V. Nuevo nombre para <i>Scutellaria leptosiphon</i> Epling, planta redescubierta en la Cordillera Oriental de Colombia. [Studies of Labiatae of Colombia V. A new name for <i>Scutellaria leptosiphon</i> Epling, a plant rediscovered in the Cordillera Oriental of Colombia]. <i>José Luis Fernández-Alonso</i>	319	Física [Physics]	
Ciencias de la Tierra [Earth Sciences]		- Superredes magnéticas. [Magnetic Supernets]. <i>Pedro Prieto</i>	395
- Subdivisión de las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín – Cordillera Central de Colombia. [Subdivision of Mafic Metamorphic rocks from Medellín – Central Andean Cordillera of Colombia]. <i>Ana María Correa M., Uwe Martens, Jorge Julián Restrepo A., Oswaldo Ordóñez-Carmona & Marcio Martins Pimentel</i>	325	- Coherencias y correlaciones cuánticas en materia condensada [Quantum coherences and correlations in Condensed Matter]. <i>Luis Quiroga</i>	411
- Los mamíferos fósiles y las edades de las sedimentitas continentales del Neógeno de la Costa Caribe Colombiana [Fossil mammals and the ages of the Continental Neogene sediments of the Caribbean coast of Colombia]. <i>Carlos Villarroel A. & Jairo Clavijo</i>	345	Historia y Filosofía de la Ciencia	
Ecología [Ecology]		- ¿En qué sentido puede hablarse de diálogo de las ciencias? Acerca de las nuevas ciencias de la complejidad. [In which sense can we talk about a dialogue between the Sciences? An Essay concerning the new Sciences of Complexity]. <i>Carlos Eduardo Maldonado</i>	417
- Esquemas espaciales de zonación ecológica y morfología de las lagunas de los atolones y complejos arrecifales de un archipiélago oceánico del Caribe: San Andrés y Providencia (Colombia). [Spatial patterns of ecological and morphological zonation of Atoll lakes and reef complexes of an oceanic archipelago of the Caribbean: San Andrés and Providencia (Colombia)]. <i>Juan Manuel Díaz M.</i>	357	Química [Chemistry]	
- La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (<i>Coffea arabica</i> L.) [Redistribution of solar radiation and rainfall with coffee plantations (<i>Coffea arabica</i> L.)] <i>Álvaro Jaramillo-Robledo</i>	371	- Utilidad del método extendido de Hildebrand en el estudio de la solubilidad del acetaminofén en mezclas agua-propilenglicol. [Usefulness of the Extended Hildebrand Solubility Approach in the Solubility Study of Acetaminophen in Water-Propylene Glycol Solvent Mixtures]. <i>Fleming Martínez</i>	429
- Variación morfométrica en poblaciones naturalizadas y domesticadas de la tilapia del Nilo <i>Oreochromis niloticus</i> (Teleostei: Cichlidae) en el norte de Colombia. [Morphometric variation in naturalized and domesticated		Zoología [Zoology]	
		- Gastrópodos de la región subxerofítica de La Herrera, Mosquera, Cundinamarca, Colombia [Gastropods of Subxerophytic region of La Herrera, Mosquera, Cundinamarca, Colombia]. <i>Mónica Lucía Vera-Ardila & Edgar L. Linares</i>	439
		Constitución de la Academia [Members of the Academy]	457
		Publicaciones de la Academia [Publications of the Academy]	459

ESTUDIOS EN LABIATAE DE COLOMBIA V. NUEVO NOMBRE PARA *SCUTELLARIA LEPTOSIPHON* EPLING, PLANTA REDESCUBIERTA EN LA CORDILLERA ORIENTAL DE COLOMBIA

por

José Luis Fernández-Alonso*

Resumen

Fernández-Alonso, J. L.: Estudios en Labiatae de Colombia V. Nuevo nombre para *Scutellaria leptosiphon* Epling, planta redescubierta en la Cordillera Oriental de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 319-324. 2005. ISSN 0370-3908.

Dado que el binomio *Scutellaria leptosiphon* Epling, asignado a una especie colombiana de la Secc. *Cardinales* Epling, es un homónimo posterior de *S. leptosiphon* Nevsky, se propone para la planta colombiana el nombre nuevo *S. parrae* Fern. Alonso. Se presenta una descripción enmendada, documentación fotográfica e información sobre el hábitat y conservación de esta especie, recientemente localizada en bosques nublados de Cundinamarca. Esta llamativa especie de *Scutellaria* era sólo conocida por una descripción incompleta, basada en una colección (tipo) efectuada en el departamento del Huila en 1880.

Palabras clave: Colombia, Conservación, Corología, Labiatae, *Scutellaria*, Taxonomía.

Abstract

Because the name *Scutellaria leptosiphon* Epling, assigned to a Colombian species of the Section *Cardinales* Epling, is an later homonym of *S. leptosiphon* Nevsky, the new name *S. parrae* Fern. Alonso is proposed for this plant. An emended description, photographic record and additional information relative to habitat and conservation of this species is presented. This distinctive *Scutellaria* recently rediscovered in cloud forest of Cundinamarca, Colombia, was previously known from an incomplete description, based on the type collection, made in Huila Department in 1880.

Key words: Labiatae, Colombia, Conservation, Chorology, *Scutellaria*, Taxonomy.

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

Introducción

Continuando con las notas sobre labiadas colombianas (Fernández-Alonso, 2002, 2003) y retomando el género *Scutellaria* que fue abordado de modo preliminar hace algunos años (Fernández-Alonso, 1989), en la presente entrega se trata una de las especies colombianas menos conocidas hasta la fecha, *S. leptosiphon* Epling. Este binomio fue creado por Epling (1942) para solucionar la homonimia en que había incurrido él mismo al proponer el nombre *S. elliptica* para una nueva especie de la Sección *Cardinales* recolectada por F.C. Lehmann en el departamento del Tolima, asignado a una nueva especie. Al analizar ahora lo referente a *S. leptosiphon*, se detectó que este nombre era también ilegítimo cuando se propuso (homónimo posterior) hace ya más de 60 años y, probablemente, la no localización de nuevas colecciones de esta planta hizo que el problema nomenclatural permaneciera hasta nuestros días sin resolver. En este sentido, siguiendo las directrices del Art. 53 del ICBN (Greuter et al., 2002), se asigna más adelante a esta planta, el nombre nuevo de *Scutellaria parrae*.

Durante el inventario de uno de los pocos remanentes de bosque nublado existentes en la región de San Francisco, Cundinamarca (en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental de Colombia), inventario recientemente llevado a cabo por el colega Carlos Parra-O., tuve la grata sorpresa de recibir para estudio algunas muestras pertenecientes a una llamativa especie del género *Scutellaria*, provista de flores de color fucsia de casi cinco cm de longitud. Un primer estudio de esta planta sugería que se trataba de una posible nueva especie de la Sección *Cardinales*, relacionada sólo con *S. leptosiphon* entre las especies conocidas de esta sección (Epling, 1942). Un análisis más detallado de la única colección conocida de *S. leptosiphon* (Lehmann 2348, US), y de la escasa información publicada sobre esta especie en el protólogo y en revisiones posteriores (Epling, 1936, 1937, 1939, 1942), permitió sugerir la posible identidad de nuestra planta con la de Lehmann. Por otra parte, al rastrear la indicación locotípica proveniente de la etiqueta de herbario "Tolima, bei S. Anna, Río Cabrera, 1500 m, 8.1. 1883", se encontró que en realidad se trataba de la localidad Santana, actualmente perteneciente al departamento del Huila (en límites con el Tolima), localidad recorrida por el río Cabrera entre los 1000 y 2500 m. Esto situaba la localidad tipo de *S. leptosiphon* en el mismo flanco de la Cordillera a escasos 170 Km en línea recta, de la localidad de la planta recientemente recolectada. La aparentemente significativa diferencia entre las cotas altitudinales de las dos recolecciones (de unos 1300 m de diferencia), no es



Figura 1. *Scutellaria parrae* Fern. Alonso. A. Detalle del Holótipo (sub. *S. elliptica* Epl.), C. F. Lehmann 2348, US (Fototipo).

en nuestro concepto relevante, si se tiene en cuenta el margen de error de las localidades de colección de Lehmann, efectuadas hace más hace 125 años.

Hay una coincidencia básica entre nuestra planta y la descrita en el protólogo de "*S. leptosiphon*", en especial en lo referente a la inflorescencia y a la morfología y dimensiones de la corola. Se observan no obstante algunas diferencias en las hojas, siendo las de nuestra planta con respecto al tipo, ligeramente más anchas (4-6 x 2,3-3 cm) y más largamente pecioladas (1,2-2 cm), diferencias que no fueron consideradas de suficiente peso como para tratar la nueva planta como entidad independiente.

***Scutellaria parrae* Fern. Alonso, nom. nov.**

S. elliptica Epling, Rep. Spec. Nov. Regni Veg. 85: 177. 1936; non *S. elliptica* Muhl., in Trans. Am. Phil. Soc. 3: 173, 1793, nomen; nec. *S. elliptica* Spreng. Mantissa Prima Halensis, Nov. Pl. 44, 1807.

Ind. Loc.: "In Colombia prov. Tolima prope Santa Ana".



Figura 2. *Scutellaria parrae* Fern. Alonso. **A.** Detalle de una rama florida, a partir de *Parra-O.* 557. **B.** Detalle de los cálices en la fructificación, a partir de *Parra-O.* 657. **C.** Hábito de la planta, a partir de *Parra-O.* 557. Escala (barra negra) = 1 cm. (Fotografías C. Parra-O.).

S. leptosiphon Epling, Univ. Calif. Publ. Bot. 20(1): 126. 1942 (nom. nov.), non. *S. leptosiphon* Nevski, Acta Inst. Bot. Acad. Sc. URSS, Ser. I, 4: 324. 1937, - **nom. illeg.**

Tipo: COLOMBIA. "Tolima (Huila), Bei S. Anna (Santana), Río Cabrera/ 8-I-1883" Plantae ...Columbianae / F.C. Lehmann (sello)/ *Lehmann 2384* (Holotypus US-934882 -fotografía-).

Etimología: el epíteto específico propuesto honra al colega y amigo Carlos Parra-O., quien descubrió las nuevas poblaciones de esta planta y suministró abundante información gráfica y de campo.

Hierba perenne de 40-80 cm, suberecta o apoyante, escasamente ramificada; tallo inferior y medio grisáceo-crema, de aspecto estriado-suberoso, con sectores nítidos donde se ha exfoliado la epidermis; zona superior con pelos cortos, incurvo-ascendentes; entrenudos 2,5-8 cm de longitud. Hojas con pecíolo (4)6-16(20) mm de largo; láminas discoloras, verde oscuro y nítidas por el haz y verdoso-glaucos u oliváceo, a veces con ligero tinte violeta por el envés; elípticas, truncadas o cuneadas en la base, agudas en el ápice y con margen gruesa y levemente crenada, a veces subentera, ligeramente recurvada hacia abajo; (4)5-7 x (1,5)2-3 cm; con 5-6 pares de nervios laterales; haz glabro con nervaduras ligeramente excavadas, envés glabrescente a excepción de las nervaduras, éstas con pelos cortos estrigoso ascendentes. Inflorescencia en racimo terminal 6-9 cm de largo, con 15-20 flores, eje con pelos articulados, ascendentes, muy conspicuos; con brácteas persistentes, sésiles, las basales opuestas y alternas en la mitad o 2/3 superiores de la espiga, de estrechamente oblongas a lanceoladas, más largas que el pedicelo, de 1,2-1,4 cm x 0,2-0,3 cm, subglabras. Pedicelo floral rojizo-violeta, 4-5 mm de longitud, densamente cubierto de pelos articulados ascendentes; flor 4,2-4,8 cm; cáliz 4,5-5 x 3,5 mm; escutelo verde pálido ca. 1 mm de alto, externamente con indumento muy corto de pelos septados, ligeramente acostado-ascendentes; corola fucsia intenso o rojizo-púrpurea, ligeramente arqueada-sigmoide, 4,1-4,6 cm de longitud, tubo estrecho 35-40 mm de longitud, en los 2/3 inferiores 1-1,5 mm de ancho y ensanchándose en el tercio superior, 4-4,5 (5) mm; labio superior en casco (galea) 8-9 mm de largo, lábio inferior más corto, patente, ca. 5-6 mm de largo; corola recubierta de pelos púrpura, septados, 0,5-0,8 mm de largo. Estambres blanquecinos, con filamentos glabros, anteras alojadas en la gálea, elipsoides, ca. 1 mm de longitud x 0,6 de ancho. Estilo glabro. Cáliz fructífero ca. 8 mm de longitud x 7 mm de ancho; escutelo 3-4 mm de alto. Núculas (inmaduras) subsféricas, 1,3 mm de diámetro, finamente tuberculadas.

Material examinado: COLOMBIA. **Cundinamarca.** Mpio. de San Francisco, hacienda La Laja, bosque nublado, 2855 m, 29 ago 2004, *C. Parra-O et al. 557* (COL, fl); ibídem, 26 sep. 2004, *C. Parra-O et al. 599* (COL, fl); ibídem, creciendo en el bosque, 2880 m, 9 ene 2005, *C. Parra-O et al. 657* (COL, fl, fr).

Hábitat y distribución

Conocida sólo de dos localidades de la vertiente occidental de la Cordillera Oriental de Colombia, en remanentes de bosque nublado, entre los (1500) 2850-2900 m. En la localidad recientemente descubierta, es una planta relativamente escasa, que se localiza en ambientes sombreados. La planta crece en suelos húmedos, relativamente cerca de un curso de agua, junto con arbolitos y arbustos como: *Saurauia scabra* (Kunth) Dietr. (Actinidaceae), *Palicourea cf. lyristipula* Wermahn (Rubiaceae), *Solanum cornifolium* Dunal (Solanaceae) y herbáceas como *Marattia laevis* Sm (Pterid.) y *Anthurium nigrescens* Engl. (Araceae). (C. Parra-O., com. pers.).

Observaciones taxonómicas

La Sección *Cardinales* agrupa de acuerdo con el criterio tradicional (Epling, 1942, 1951) a una docena de especies de Centroamérica y del Norte de Sudamérica, tratándose básicamente de hierbas grandes o arbustos débiles, poco ramificados, con corolas largas y arqueadas de color rojo, púrpura o anaranjado (corolas hasta de 6 cm de longitud). En tiempos recientes las especies de la Sección *Cardinales* fueron tratadas por Paton (1990) con criterio muy sintético como parte de los grupos no formales de especies "*speciosa*" y "*costaricana*", dentro de la Sección *Scutellaria*. Posteriormente Harley & Paton (1998) aceptan la Sección *Cardinales*, como grupo de especies aún no resulto y relacionado con la Sección *Speciosae* Epling. Por último, en una reciente contribución de Pool (1998), se reconoce una nueva especie centroamericana de esta sección (*S. ebracteata*) y se justifica además el tratamiento de *S. hookerii* Epling (tradicionalmente ubicada en la Sección *Coccineae* Epling), dentro de la Sección *Cardinales*. Del conjunto de especies de esta sección, sólo cuatro se conocen hasta la fecha de Sudamérica: *S. lindeniana* Benth. y *S. platystoma* Epling, endémicas de los Andes de Mérida, en Venezuela (Epling, 1942, 1951; Velásquez & Orsini, 1997), *S. parrae* Fern. Alonso endémica de la Cordillera Oriental de Colombia y *S. hookerii* del piedemonte amazónico de Colombia y Perú (Epling & Játiva, 1963; Fernández-Alonso, 1989), con un reciente registro de Costa Rica (Pool, 1998).

Scutellaria parrae, con base en la información presentada, puede considerarse una especie claramente caracterizada dentro de la Sección *Cardinales* y notoriamente diferente de otras especies de *Scutellaria* presentes en Colombia. De las especies sudamericanas de la Sección *Cardinales* y del resto de las especies colombianas de *Scutellaria*, se separa por presentar largas corolas (de más de 4 cm de longitud), con tubo arqueado y coloración fucsia o rojo-púrpura. Con respecto al color de la corola, que fue referido por Epling como “scarlet”, con base en información histórica, dudosamente verificable, lo tratamos aquí como fucsia o rojo-púrpura, apoyándonos en la reciente evidencia. Para facilitar su diagnóstico se presenta una clave para separar las cuatro especies sudamericanas de la Sección *Cardinales*.

Clave para las especies Sudamericanas de *Scutellaria* Sect. *Cardinales*

- 1- Hojas con pecíolos de 3-4 cm de largo, láminas con base cordada o subcordada, con indumento largo viloso-lanoso, especialmente en el envés; corola hasta 26 mm de longitud (C. Rica, Colombia y Perú) ..
..... *S. hookerii*
- 1'- Hojas con pecíolos hasta 2 cm de largo, láminas con base aguda a redondeada, subglabras o con indumento muy corto, corola al menos de 30 mm de longitud 2
- 2- Corola 42-48 mm de longitud, fucsia o rojo-púrpura (Colombia) *S. parrae*
- 2'- Corola hasta de 35 mm de longitud, rosado-rojiza o blanco-rosada 3
- 3- Hojas con pecíolos de 4-7 mm de largo, láminas angostamente elípticas 3,5-7,5 x 1,5-2,4 cm, corola rosa intenso o rosado-rojiza (Venezuela)
..... *S. lindeniana*
- 3'- Hojas con pecíolos 1-2 cm de largo, láminas ovadas a estrechamente ovadas 8-9 x 3,5-5 cm, corola con galea rosada y tubo blanco (Venezuela) *S. platystoma*

Conservación

Si consideramos los actuales criterios de categorización de especies amenazadas de la Flora (IUCN, 2001; Calderón *et al.* 2002; Llamozas *et al.*, 2003), *S. parrae* entraría claramente en alguna de las categorías de amenaza reconocidas. Se propone aquí catalogar a esta especie, como categoría global, en Peligro Crítico (CR), con base en los siguientes factores: a) La escasa extensión de pre-

sencia de esta especie (de menos de 3000 Km²); b)- Sólo se han detectado (en un periodo de 125 años), dos localidades donde crece la especie; c)- Solo hay constancia de plantas vivas en una de las localidades, y d)- La gran disminución que han sufrido los bosques altoandinos en la Cordillera Oriental de Colombia y en el norte de los Andes en general en los últimos 80 años y la presión que actualmente se ejerce sobre ellos (Ulloa & Jorgensen, 1993; Gentry, 1995; Sánchez & Hernández-Camacho, 1995; Rangel, 2000; Llamozas *et al.*, 2003). De igual modo, para asegurar la supervivencia de esta llamativa especie, que pudiera tener utilidad como planta ornamental, es necesario: a)- Evaluar las poblaciones en el campo, en las dos localidades históricamente conocidas y b)- Promover la preservación de los remanentes de bosque altoandino de la región y la recuperación de áreas aledañas más o menos intervenidas.

Agradecimientos

Agradezco a Carlos Parra, las valiosas muestras y fotografías que posibilitaron el estudio de esta planta y la revisión del manuscrito. A la Universidad Nacional de Colombia y al Instituto de Ciencias Naturales, las facilidades dadas para adelantar el presente trabajo.

Bibliografía

Calderón, E., G. Galeano & N. García (eds.). 2002. Libro Rojo de Plantas Fanerógamas de Colombia. Volumen 1. Serie Libros Rojos Esp. Amenaz. de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto A. v. Humboldt, Instituto Ciencias Naturales, U. Nacional, Min. M. Ambiente.

Epling, C. 1936. Synopsis of the South American Labiatae. Repert. Spec. Nov. Regn. Veg. Beih. **85**: 1-341.

_____. 1937. The Labiatae of the Northern South America; Colombia, Ecuador & Venezuela. Fedde Rep. Sp. Nov. Beih. **95**: 5-144.

_____. 1939. Apuntes sobre el género *Scutellaria* de la América Tropical y Subtropical. Lilloa **4**: 229-275.

_____. 1942. The American species of *Scutellaria*. Univ. Calif. Publ. Bot. **20**: 1-146.

_____. 1951. Supplementary notes on American Labiatae-V. Brittonia **7**: 129-142.

_____. & C. Játiva. 1963. Supplementary notes on American Labiatae-VIII. Brittonia **15**: 366-376.

Fernández-Alonso, J. L. 1989. Notas sobre *Scutellaria* (Labiatae) en Colombia y Ecuador. Anales Jard. Bot. Madrid **47**(1): 105-123.

_____. 2002. Estudios en Labiatae de Colombia III. Novedades en *Lepechinia* Willd., *Salvia* L. y *Satureja* L. Anales Jard. Bot. Madrid **59** (2): 344-348.

- _____. 2003. Estudios en Labiatae de Colombia IV. Novedades en *Salvia* y sinopsis de las Secciones *Angulatae* y *Purpureae*. *Caldasia* **25** (2): 235-281.
- Gentry, A. H.** 1995. Patterns of Diversity and Floristic Composition in Neotropical Montane Forest. Pp. 103-126, in: S. Churchill et al. (eds.) Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forest. The New York Botanical Garden.
- Greuter, W., McNeill, J., Barrie, F. R., Burdet, H. M., Demoulin, V., Filgueiras, T. S., Nicholson, D. H., Silva, P. C., Skog, J. E., Trehane, P., Turland, N. J. & D. L. Hawsworth** (eds.) 2002. Código Internacional de Nomenclatura Botánica (Código de Saint Louis). -Ed. en español por R. Kiesling-. Instituto Bot. Darwinian & Missouri Bot. Garden Press.
- Harley, R. & A. Paton.** 1998. Notes on New World *Scutellaria*. *Kew Bull* **54** (1): 221-225.
- IUCN.** 2001. Red List Categories: Versión 3.1. Prepared by The IUCN Species Survival Commission. IUCN, Galnd, Switzerland and Cambridge, UK.
- Llamozas, S., Duno de Stefano, R., Meier, W., Riina, R., Stauffer, F., Aymard, G., Huber, O. & R. Ortiz.** (2003). Libro rojo de la flora venezolana. Provita, Fundación Polar & Instituto Botánico de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Paton, A.** 1990. A global taxonomic investigation of *Scutellaria* (Labiatae). *Kew. Bull.* **45**(3): 399-450.
- Pool, A.** 1998. Notes on Central American *Scutellaria* (Lamiaceae). *Novon* **8**: 62-66.
- Rangel Ch., J. O.** 2000. Flora y vegetación amenazada. Pp. 785-813, en: J. O. Rangel (ed.). Colombia Diversidad Biótica III. La región de vida paramuna de Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez P., H. & J. Hernández-Camacho** 1995. La Biodiversidad de los Andes de Colombia y su conservación en los Parques Nacionales. Pp. 619-626 in: S. Churchill et al. (eds.) Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forest. The New York Botanical Garden.
- Ulloa Ulloa, C. & P. M. Jorgensen.** 1993. Árboles y arbustos de los Andes de Ecuador. *AAU Reports* **30**: i-xx, 1-126.
- Velásquez, D. & G. Orsini** 1997. Aportes al conocimiento de la familia Lamiaceae en Venezuela I. *Ajuga, Teucrium & Scutellaria*. *Acta Bot. Venez.* **20**: 93-115.

Recibido el 15 de febrero de 2005.

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2005.

SUBDIVISIÓN DE LAS METAMORFITAS BÁSICAS DE LOS ALREDEDORES DE MEDELLÍN – CORDILLERA CENTRAL DE COLOMBIA

por

Ana María Correa M.¹, Uwe Martens², Jorge Julián Restrepo A.³,
Oswaldo Ordóñez-Carmona⁴ & Marcio Martins Pimentel⁵

Resumen

Correa A.M., U. Martens, J. J. Restrepo, O. Ordóñez-Carmona & M. Martins.: Subdivisión de las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín – Cordillera Central de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 325-344. 2005. ISSN 0370-3908.

Las características encontradas en las metamorfitas básicas que afloran en los alrededores de la ciudad de Medellín permiten diferenciar al menos dos grupos principales: uno compuesto por grandes cuerpos de metabasaltos anfibolíticos sin texturas reliquia que corresponden a la mayor parte de la unidad *Anfibolitas de Medellín* y otro grupo formado por cuerpos menos extensos de plutones bandeados y metamorizados, los cuales constituyen los *Metagabros de El Picacho*. Los metagabros se metamorizaron hidrotermalmente en facies esquisto verde - anfibolita baja y corrientemente presentan estructuras miloníticas y están relacionados espacialmente con las Dunitas de Medellín, conformando, junto con éstas, el *Complejo Ofiolítico de Aburrá*.

Palabras clave: Anfibolitas, gabros bandeados, Medellín, El Picacho, Cordillera Central, Colombia.

-
- 1 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. A.A. 1027 Medellín – Colombia, Instituto de Geociencias – Universidad de Brasilia – Brasil. CEP 70910-900. Correo electrónico: anamacor@unb.br
 - 2 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. A.A. 1027 Medellín – Colombia, Centro Universitario del Norte, Universidad de San Carlos de Guatemala. Correo electrónico: uwe.martens@geoguate.net
 - 3 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. A.A. 1027 Medellín – Colombia. Correo electrónico: jrestrep@epm.net.co
 - 4 Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. A.A. 1027 Medellín – Colombia. Correo electrónico: oordonez@unalmed.edu.co
 - 5 Instituto de Geociencias – Universidad de Brasilia – Brasil. CEP 70910-900.

Abstract

Based on the features discovered in metamorph rocks from Medellín, two different rock units may be identified. One of them, *Medellin Amphibolites*, is an extensive amphibolitic body that shows no relics of its metavolcanic protolith and is frequently associated with metasediments. We redefine this unit as not enclosing banded metagabbros, which should be regarded as a separate lithostratigraphic unit that we designate *El Picacho Metagabbros*. El Picacho Metagabbros show greenschist- to lower-amphibolite-facies parageneses, conspicuous mylonitic structure, no relation to metasediments, and spatial association to the Medellín Dunite. We propose that these gabbros and peridotites constitute the *Aburrá Ophiolitic Complex*.

Key words: Amphibolites, banded gabbros, Medellín, El Picacho, Central Cordillera, Colombia.

Geología regional

El basamento metamórfico del eje de la cordillera Central en los alrededores de Medellín está compuesto por metabasitas y gneises de alto grado, asociados con esquistos de bajo grado (Botero, 1963; Echeverría, 1973; Restrepo & Toussaint, 1984). Botero (1963) agrupó estas rocas dentro del Grupo Ayurá – Montebello, que fue subdividido por Echeverría (1973) en la Zona Ayurá para el conjunto de alto grado, y la Zona Montebello para el de grado bajo. Restrepo & Toussaint (1982; véase también Restrepo *et al.*, 1991), al identificar varios metamorfismos superpuestos en las metamorfitas de la cordillera, eventos Devónico-Carbonífero, Pérmico-Triásico, y Cretácico, proponen renombrar la unidad como Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central. En efecto, trabajos geocronológicos recientes con el sistema U-Pb Shrimp, apoyan la idea del carácter polimetamórfico de la unidad (Ordóñez, 2001; Vinasco *et al.*, 2003).

El complejo incluye cuerpos mayores de anfibolitas (Figura 1) que se agrupan bajo el nombre de Anfibolitas de Medellín (Restrepo & Toussaint, 1984) por su ubicación cercana a dicha ciudad. Dataciones de tales rocas, como las obtenidas por Restrepo *et al.* (1991), sirvieron de fundamento para proponer un evento metamórfico cretácico; se sugirió que las metabasitas serían correlacionables con las rocas del Complejo Arquía, correspondiendo a la parte básica de una ofiolita que se habría metamorfoseado en una zona de subducción cretácica (Toussaint, 1996). McCourt *et al.* (1984) estudiaron rocas del Complejo Arquía más al sur, y no concuerdan con una edad cretácica para el metamorfismo, sino que la consideran paleozoica o anterior. Dataciones recientes Ar-Ar de las Anfibolitas de Medellín (Martens & Dunlap, 2003) indican que las edades cretácicas obtenidas se deben a perturbaciones térmicas producidas por la intrusión de grandes plutones mesozoicos como el Batolito Antioqueño; la edad de metamorfismo sería más antigua, posiblemente dentro del lapso Pérmico-Triásico.

Al norte y oriente del valle de Aburrá yace la Dunita de Medellín, una unidad ultramáfica elongada que contiene cuerpos menores de harzburgita (Figura 1), en contacto tectónico, generalmente subhorizontal, con las anfibolitas de Medellín (Restrepo & Toussaint, 1974; Álvarez, 1987). El emplazamiento de las rocas ultramáficas probablemente ocurrió entre el Triásico y el Cretácico (Restrepo & Toussaint, 1974 y 1978; Álvarez, 1987) aunque propuestas más recientes sugieren que el emplazamiento pudo darse antes o durante la orogenia Pérmico-Triásica (Restrepo, 2003). En la literatura hay referencias en las que se plantea que tanto las anfibolitas como las ultramafitas pertenecen a una ofiolita desmembrada (Álvarez, 1987; Toussaint, 1996), sin que al momento se hayan señalado otras litologías en los alrededores de Medellín que puedan formar parte de tal.

Otros cuerpos geológicos importantes en la parte septentrional de la cordillera Central son los intrusivos mesozoicos de composición básica a intermedia, dentro de los que se destaca el Batolito Antioqueño, del cual se han obtenido edades de enfriamiento del sistema K/Ar en biotita entre ~ 65 y 90 Ma. Al oriente de Medellín el batolito es intrusivo en anfibolitas y gneises de alto grado, y posiblemente también en los cuerpos ultramáficos (Restrepo & Toussaint, 1984; Álvarez, 1987), limitando al Cretácico Tardío la edad mínima del metamorfismo de las anfibolitas y del emplazamiento de las ultramafitas.

Objetivo

Varios autores han advertido diferencias considerables en las anfibolitas que afloran en los alrededores de Medellín (valle de Aburrá) y han dejado duda sobre la conveniencia de agruparlas en una sola unidad litoestratigráfica (Restrepo, 1986; INGEOMINAS, 1996; Rendón, 1999). Las diferencias son especialmente notables entre las metabasitas que yacen en las vertientes oriental y occidental del valle.

Este trabajo tiene como objeto presentar una subdivisión de las metamorfitas básicas que afloran en los alrededores de Medellín en dos unidades principales, con base en las notables diferencias estructurales, petrográficas y geoquímicas que presentan, y proponer un origen particular para cada una. Se verá que en la zona hay grandes

cuerpos anfibolíticos que no tienen estructuras reliquia y que se interpretan como metabasaltos, y cuerpos menos extensos de metagabros bandeados, que constituyen una unidad más que puede ser integrada dentro de una posible ofiolita desmembrada en los alrededores del valle de Aburrá.

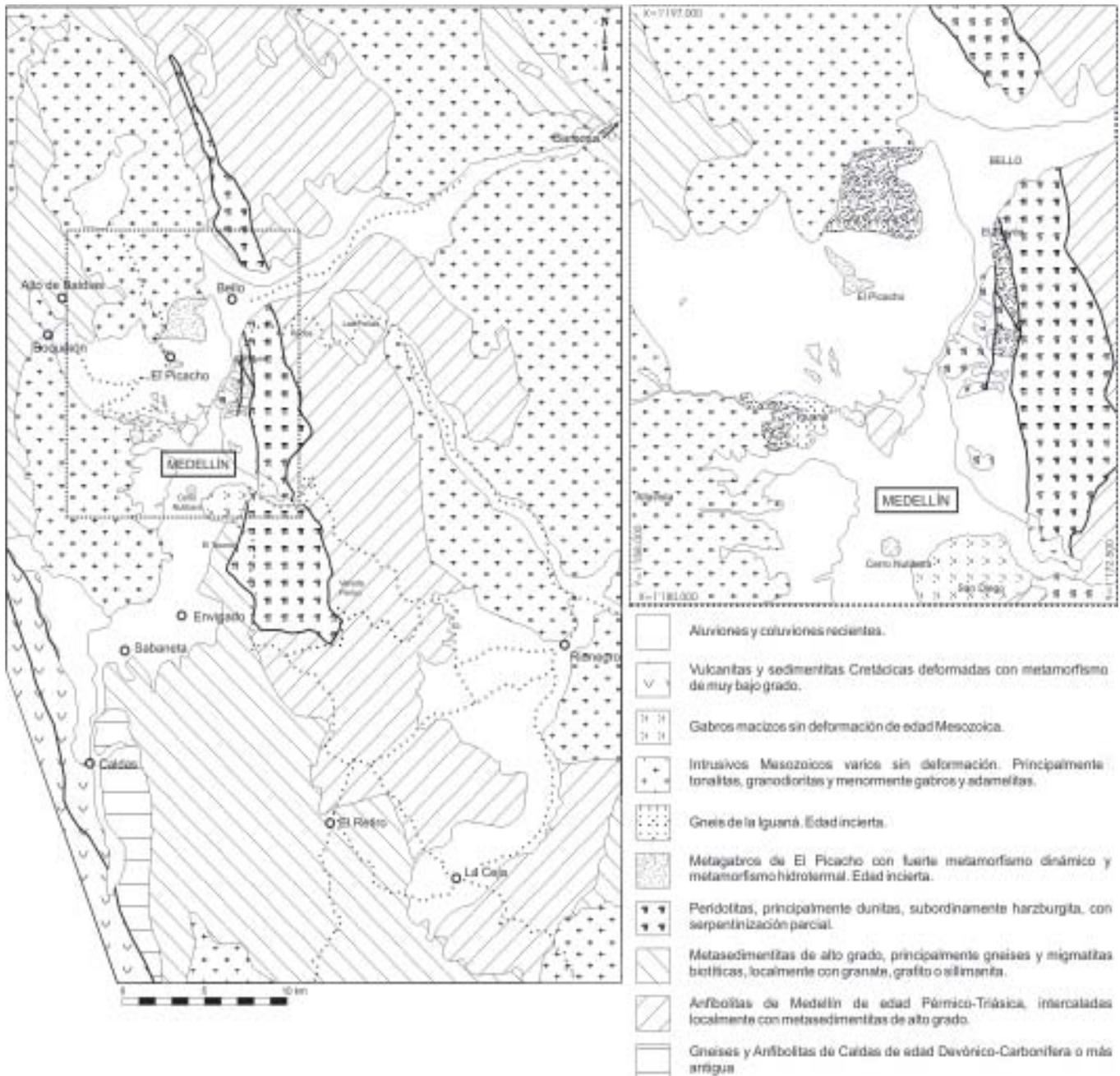


Figura 1. Mapa geológico de los alrededores de la ciudad de Medellín. Adaptado de Botero (1963), Ingeominas (1997), Rendón (1999), Estrada (2003)

Este trabajo se desarrolló principalmente como tesis de grado en la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, Sede Medellín.

Metagabros de El Picacho

Los *Metagabros de El Picacho* se definen como una nueva unidad en la litoestratigrafía de los alrededores de Medellín. Estas rocas afloran en el cerro El Picacho y sus alrededores (sector noroccidental de Medellín; Figura 1), en el cerro Nutibara (centro de la ciudad), sector de El Tesoro (oriente), autopista Medellín Bogotá y barrio El Playón (nororiente). Se encuentra además gran cantidad de bloques de metagabros en los extensos depósitos de vertiente al occidente de Medellín; en menor cantidad existen bloques dispersos en la vereda Perico al oriente de la ciudad. A diferencia de las Anfibolitas de Medellín, los Metagabros de El Picacho afloran como cuerpos aislados, de menor tamaño y no están asociados con paragneises.

Características mineralógicas y estructurales

La paragénesis mineral está representada por minerales primarios y secundarios, siendo estos últimos los más abundantes. Los minerales primarios son clinopiroxeno y plagioclasa. Los minerales secundarios son anfíboles, plagioclasa y en menor cantidad cuarzo, epidota, y ocasionalmente opacos (Tabla 1).

El clinopiroxeno es anhedral, en granos pequeños, de incoloro a verde claro. Los clinofanfíboles ocurren en cristales prismáticos medios con bordes irregulares, cuyo pleocroísmo varía de incoloro a verde muy claro, y en agregados aciculares a fibrosos finos (Figura 2a), con pleocroísmo de verde claro a verde azulado. Este mineral reemplaza a un máfico anterior, un piroxeno y quizá otro anfíbol primario. La plagioclasa está intensamente saururizada, lo que indica que la plagioclasa original tenía un componente cálcico importante. No fue posible determinar su composición por el método Michel Lévy. Los granos son anhedrales de bordes completamente irre-

Tabla 1. Composición mineralógica de los Metagabros de El Picacho y Anfibolitas de Medellín, Boquerón y El Retiro analizadas en lámina delgada.

Muestra	Unidad ¹	Hbl	Act/Trm	Pl	Qtz	Bt	Grt	CPx	Tnt	Opacos	Chl	Ep	Cc	Ap	Zrn
CMK004A	A.M.	50		40	5				3					Acc.	?
CMK 015	A.M. ²	45		40						3	2	2		Acc.	Acc.
CMK 021	A.M. ²	60		20	15					3				?	?
CMK 022A	A.M.	55		30	10				3	Acc.	<2	<2			Acc.
CMK 023	M.P.		45	45				?				10			
CMK 028A	M.P.		60	40					Acc.			<2			
CMK 028B	M.P.		50	48					Acc.			2			
CMK 030	A.M.	55		40	3				2	Acc.				Acc.	Acc.
CMK 033A	A.M.	35		35	5			20	Acc.	Acc.		<2			
CMK 033B	A.M.	40		50					5						Acc.
CMK 034A	A.M. ²	65		25	5	3	<2		<2	2				Acc.	Acc.
CMK 034C	A.M. ²	65		25	5				<2	3	<2	<2		Acc.	Acc.
CMK 038A	A.B.	50		35	10				3	2					
CMK 039	A.B.	50		35	10				4	Acc.					
CMK 040A	M.P.		55	40				1		Acc.		4			
CMK 042A	A.B.	55		35	13				1	Acc.					
CMK 042B	A.B.	60		35					2	2				Acc.	
CMK 044	M.P.?	50		40				1		8					
CMK045	A.R	50		40				5	Acc.	5				Acc.	Acc.
CMK 046	A.M.	65		15	10		Acc.		Acc.	2	<2			Acc.	Acc.
CMK057	A.R	45		35	10				2	5	3			Acc.	
CMK 113A	A.M. ²	60	<2	30		3				3	<2	<2		Acc.	
CMK 119D	A.M. ²	50		40		2			<2	3	<2	<2			
CMK 120A	A.M. ²	40		20	10		15	5	2	5	<2	<2	<2	Acc.	Acc.
CMK 141	A.M.	50		40	5				2						
CMK 144	M.P.	45		50				5							

¹ A.M. Anfibolita de Medellín; M.P. Metagabro de El Picacho; A.B. Anfibolita de Boquerón; A.R. Anfibolita de El Retiro.

² Anfibolitas intercaladas con metasedimentitas de alto grado.

gulares, aunque se conservan pequeños residuos de los cristales primarios.

Las estructuras de los metagabros de El Picacho son de dos clases: reliquias y metamórficas. Las estructuras reliquias de un protolito ígneo corresponden a bandeamiento composicional y estructural. El bandeamiento composicional está definido por la presencia de capas centimétricas a decimétricas, unas ricas en minerales ferromagnesianos y otras ricas en félsicos. El bandeamiento estructural se carac-

teriza por la alternancia de bandas de grano grueso a muy grueso con bandas de grano fino (Figura 2b).

En los planos perpendiculares a la lineación, donde es posible ver las estructuras originales, las rocas son faneríticas de grano grueso y localmente muy grueso (Figura 2c). Los anfíboles y agregados de éstos alcanzan 1.5 cm de largo y 1 cm de ancho, tienen desarrollo cristalino moderado, con exfoliación notable, mientras que la plagioclasa es de menor tamaño y en escala mesoscópica es anhedral.

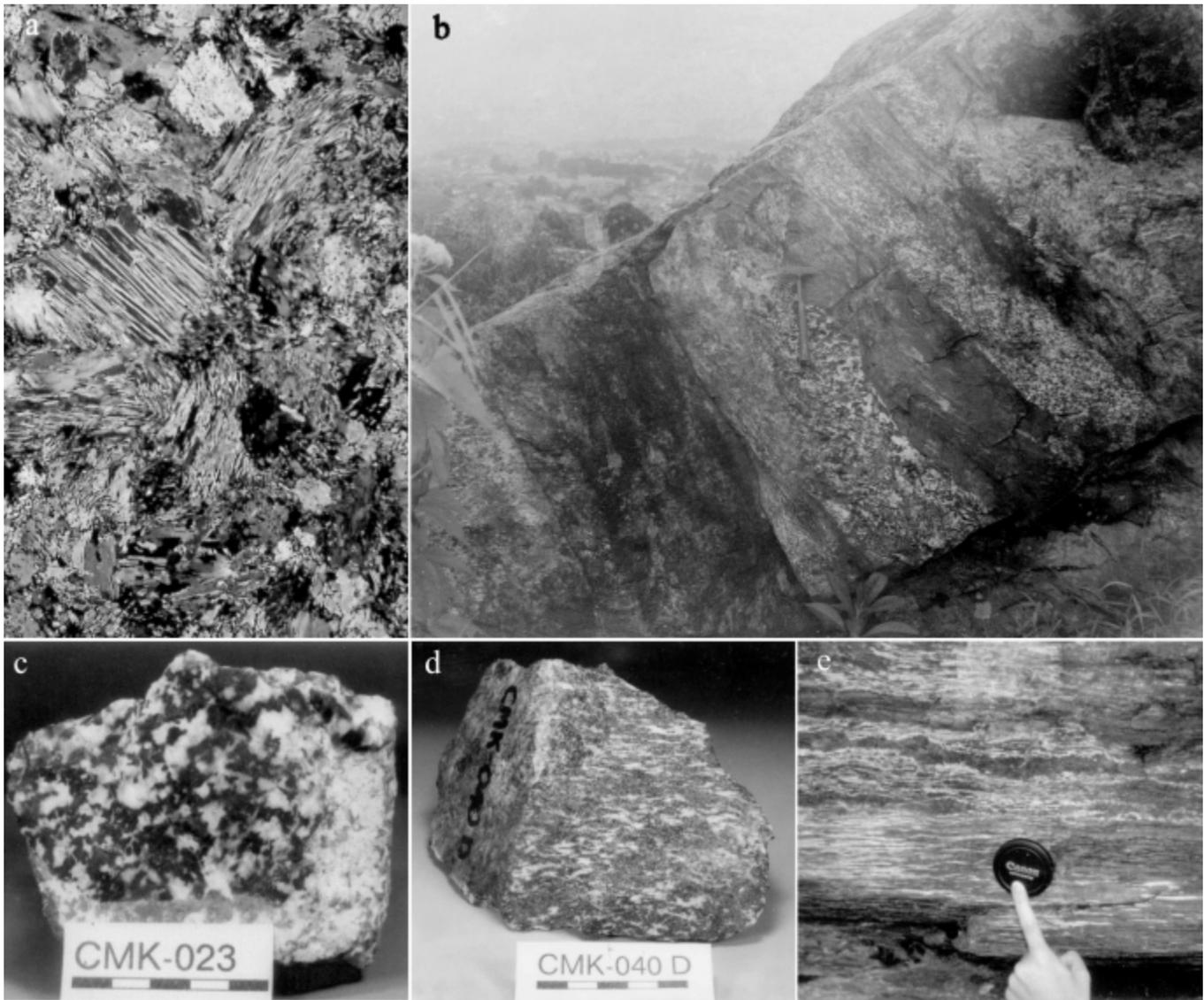


Figura 2. Fotografías de los Metagabros de El Picacho. (a) Fotomicrografía de la muestra CMK 040A, en los que se notan la textura de la roca y los anfíboles aciculares. (b) Bandeamiento composicional y estructural del afloramiento en el cerro El Picacho (martillo mide 32 x 17 cm). (c) Corte perpendicular a la lineación de la muestra CMK 023, en los que aún se descubre la textura ígnea de la roca (cuadros de la escala miden 1 cm). (d) Textura de la muestra CMK 040D en plano paralelo a la lineación. (e) Afloramiento en la vereda Perico, en el que se notan los fuertes efectos dinámicos de la roca (tapa de cámara fotográfica mide 58 mm).

Las estructuras metamórficas se deben a deformación dinámica y entre las más comunes se encuentran: lineación fuerte por alargamiento (“stretching lineation”), “flasers”, pequeñas cintas félsicas replegadas de manera discontinua, pequeñas zonas de cizalla, y bandas que se abren y se cierran (“pinch and swell”). Con menor frecuencia se encuentra una fábrica LS. Estos rasgos permiten clasificar las muestras de algunos sectores como milonitas (Figura 2d).

En los bloques de la vereda Perico el espesor de las bandas es menor al original debido a los efectos dinámicos y es común la presencia de boudines (Figura 2e).

Además de las características propias de una deformación dinámica, los metagabros exhiben evidencias de alteración hidrotermal, que provocó reemplazamiento de los máficos por anfíboles aciculares posiblemente del tipo actinolita. A partir de la paragénesis actinolita + plagioclasa + epidota, se deduce que el metamorfismo pudo ocurrir en las facies esquisto verde o anfibolita baja (Bucher & Frey, 2002). La alteración hidrotermal pudo ocurrir en las etapas finales de la deformación como resultado de la circulación de fluidos en las zonas de cizallamiento o pudo ser también un evento térmico posterior al metamorfismo dinámico, ya que las relaciones estructurales indican que los anfíboles aciculares no presentan rasgos de deformación.

Protolito y nomenclatura de la unidad

El protolito de los metagabros de El Picacho correspondió a rocas ígneas plutónicas de composición básica, faneríticas, de grano grueso y equigranulares. Fueron rocas ígneas bandeadas. Dada la transformación mineralógica que sufrieron es difícil determinar con precisión el protolito específico de éstas. Sin embargo, debido a las características minerales y estructurales heredadas, es posible inferir que correspondieron a gabros y/o noritas.

La unidad Metagabros de El Picacho que aquí se propone, no se había señalado en la estratigrafía de la zona, porque las rocas que la conforman eran consideradas como parte de las Anfibolitas de Medellín en el sentido de Restrepo & Toussaint (1984). La propuesta del nombre tiene las siguientes justificaciones: “Metagabros” porque las rocas conservan bien las estructuras de una roca ígnea plutónica básica (recuerda a un gabro), a pesar de los cambios inducidos por el metamorfismo dinámico e hidrotermal; “de El Picacho”, por ser en el cerro El Picacho donde se hallan los mejores afloramientos con las características reliquias del protolito.

Anfibolitas de Medellín

Al oriente de la ciudad de Medellín aflora un cuerpo elongado en dirección N-S compuesto por metabasitas de alto grado asociadas localmente con paquetes de esquistos y paragneises cuarzo-feldespáticos con biotita. Como se explicó antes, Restrepo & Toussaint (1984) consideraron estas metabasitas como parte fundamental de las *Anfibolitas de Medellín*, denominación que en esta publicación se toma en un sentido más restringido, al considerar aquellas metabasitas no asociadas con paragneises que afloran principalmente al occidente y norte de la ciudad como parte de los Metagabros de El Picacho.

El cuerpo metamórfico en consideración se extiende hacia el sur hasta los municipios de El Retiro y La Ceja, donde adicionalmente se han señalado migmatitas y granulitas. Hacia el norte el cuerpo metamórfico llega hasta el municipio de Belmira. La extensión en planta de la unidad comprende aproximadamente 72 km a lo largo y un ancho promedio de 6 km (Figura 1). Hay abundantes afloramientos de buen tamaño donde las anfibolitas se presentan frescas. Vale destacar aquellos de las carreteras Medellín-Bogotá, Santa Elena y Variante Palmas-Aeropuerto.

Características mineralógicas y estructurales

La asociación mineralógica típica en esta unidad es hornblenda + plagioclasa + esfena +/- cuarzo +/- opacos (ilmenita, sulfuros) con apatitos y circones muy pequeños como accesorios (Tabla 1, Figura 3a). Hay algunas variaciones en la composición mineralógica por la presencia de paquetes donde adicionalmente aparece granate o diópsido, los cuales corrientemente se encuentran donde hay metasedimentitas intercaladas. Éstas están compuestas por esquistos o gneises cuarzo-feldespáticos con biotita, que localmente contienen granate, sillimanita, grafito o moscovita. Recientemente se reportó cummingtonita en las anfibolitas de la cuchilla Las Peñas (Estrada-Carmona, 2003).

La hornblenda es x = amarillo claro, y = verde oliva, z = verde azulado en el sector de Rodas, parte alta de Santa Elena y descenso a La Fe. El anfíbol de las muestras tomadas en Las Peñas, variante al aeropuerto, quebrada El Guamo y carretera a la Ceja es pardo, lo cual se debe a un mayor contenido de Ti en el mineral (Miyashiro, 1994). La composición de la plagioclasa, medida ópticamente por el método Michel-Lévy varía entre An₄₂ y An₅₃ (andesina-labradorita), composición que es típica de la facies de anfibolitas (Bucher & Frey, 2002). En general, las plagioclasas son más cálcicas donde los anfíboles tienen coloraciones más pardas.

Las asociaciones mineralógicas encontradas indican condiciones correspondientes a la facies de anfibolitas. La asociación plagioclasa ($\sim\text{An}_{30-50}$) + hornblenda +/- granate +/- biotita es característica de la parte central de esta facies, con temperatura mínima cercana a 600°C (Bucher & Frey, 2002). Donde el anfíbol es pardo, hay diópsido o donde la textura denota reducción del cociente área/volumen de los granos, las condiciones posiblemente fueron de facies anfibolita alta. Una muestra de la cuchilla Las Peñas (Figura 3d) con la paragénesis hornblenda + plagioclasa + granate + cuarzo + clinopiroxeno indica temperatura superior a 650°C, correspondiente a la transición entre la facies de anfibolitas y de granulitas. Debe anotarse que la estimación es válida para un gradiente barroviano que se ha verificado en las rocas del lugar pues allí el granate tiene primordialmente composición de almandino (Estrada-Carmona, 2003). Si bien las condiciones de presión y temperatura pudieron favorecer el desarrollo de granates, éstos son escasos en las Anfibolitas de Medellín, posiblemente porque el cociente FeO/MgO es insuficientemente alto (Miyashiro, 1994).

Macroscópicamente la unidad se caracteriza por la presencia de pocas bandas cuarzo-feldespáticas de espesor milimétrico a centimétrico, y por lineación sintectónica de anfíboles (foliación nematoblástica, Figura 3c).

El estudio microestructural de las Anfibolitas de Medellín permitió determinar el carácter polifásico-polimetamórfico (?) de las rocas, ya que se presentan al menos tres fases tectónicas. Las anfibolitas granatíferas tienen inclusiones alineadas o a modo de S dentro de los granates (D1) que son oblicuas en relación con la lineación externa a este mineral (D2). Las muestras tomadas en Copacabana y Rodas presentan crenulaciones cilíndricas (D3; Figura 3b) sobreimpuestas a las microestructuras anteriores. Estos resultados concuerdan con el estudio microestructural efectuado por Tamayo (1984) en la carretera Medellín-Bogotá.

Contacto con otras unidades

El contacto entre las Anfibolitas y las Dunitas de Medellín está bien representado en un tramo de 1,5 km de longitud en la autopista Medellín – Bogotá, sector de Rodas. Allí hay afloramientos decamétricos en los que se presenta una compleja asociación de anfibolitas, dunitas, esquistos talcosos, esquistos cloríticos localmente microplegados (Figura 3e) y esquistos actinolíticos, resultado de una mezcla tectónica. Ha habido consenso entre autores al considerar que la dunita reposa sobre la anfibolita debido a un cabalgamiento y que en muchos

sitios el contacto es subhorizontal (Restrepo & Toussaint, 1974; Álvarez, 1987).

Ya Botero (1963) había notado que el Batolito Antioqueño es intrusivo en las Anfibolitas de Medellín, lo cual se constata muy bien en la cuchilla las Peñas, donde se observan xenolitos de rocas foliadas dentro de la roca granítica. Además la intrusión genera migmatitas de inyección con aspecto brechoso en las metasedimentitas y anfibolitas de Las Peñas.

Todos los contactos entre anfibolitas y metasedimentitas que se observaron son concordantes. Generalmente, se pasa de manera transicional del cuerpo principal de anfibolitas a intercalaciones de metasedimentitas y anfibolitas. Ejemplos de ello se tienen en la carretera Alto de Las Palmas-Variante al Aeropuerto y en la cuchilla Las Peñas.

Anfibolitas de Boquerón

En la carretera que comunica a Medellín con el Occidente, a la altura del sitio conocido como El Boquerón, y en las quebradas Agua Fría y La Seca ubicadas cerca del lugar, afloran en pequeñas exposiciones, dada la cobertura de extensos depósitos de vertiente, un conjunto de anfibolitas con rasgos muy peculiares, que aquí se propone denominar *Anfibolitas de Boquerón*. Dentro del depósito de vertiente las anfibolitas se presentan en bloques métricos y en ciertas áreas aparecen mezcladas con los bloques de los Metagabros de El Picacho.

Características mineralógicas y estructurales

Los minerales que componen las Anfibolitas de Boquerón son hornblenda + plagioclasa + esfena +/- cuarzo + opacos (Tabla 1), asociación diagnóstica de la facies de anfibolitas a presión baja o media.

La hornblenda es media a gruesa, anhedral a subhedral, y algunas contienen cristales finos y redondeados de plagioclasa. La fórmula de pleocroísmo x = crema, y = verde amarillento, z = verde azulado, sugiere condiciones de la parte baja de la facies de anfibolitas. La plagioclasa se encuentra en agregados lenticulares o en bandas discontinuas que se abren y se cierran compuestas por granos finos, equidimensionales, con poligonización, aunque también se distinguen granos mayores muy sauritizedados con macla polisintética. La esfena es abundante y está íntimamente asociada con ilmenita. En cantidad moderada, se presenta la formación de minerales secundarios como anfíboles aciculares desordenados, epidota y clorita.

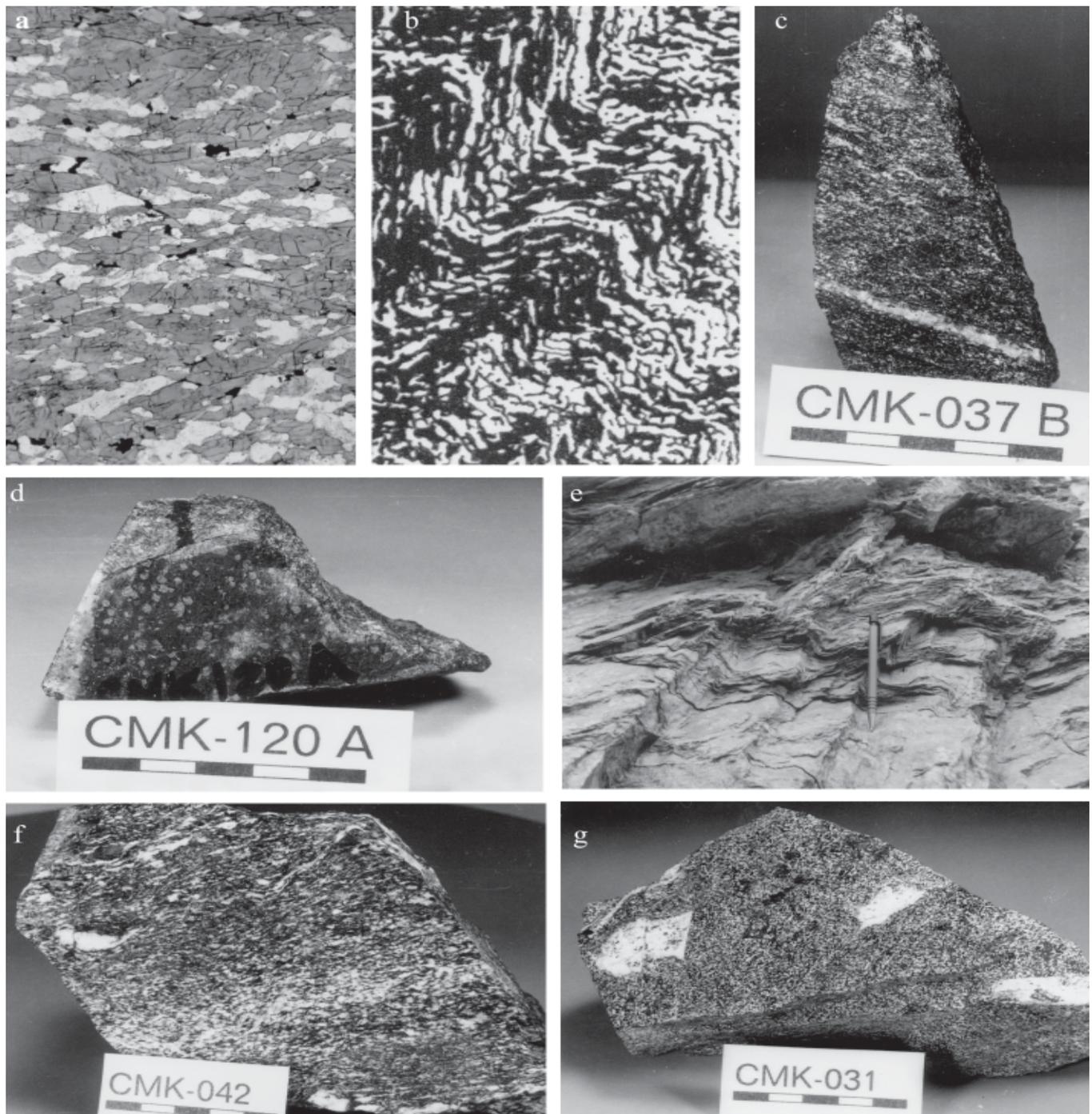


Figura 3. (a) Macrofotografía de una típica Anfibolita de Medellín tomada en el cuerpo principal al Este de Medellín (rectángulos de la escala miden 1 cm cada uno). (b) Dibujo de la crenulación de las Anfibolitas de Medellín en el sector de Rodas y Copacabana. (c) Anfibolita del cuerpo principal al Este de Medellín; se notan las bandas milimétricas de minerales félsicos. (d) Anfibolita granatífera del sector de Las Peñas; nótese la abundancia de granate y la menor intensidad en la foliación de la roca, en comparación con las otras muestras. (e) Esquistos de color verde muy plegados en la zona de contacto entre la Dunita y las Anfibolitas de Medellín.

A escala macroscópica se denota una intercalación de bandas milimétricas a centimétricas de grano medio donde la proporción de félsicos es más notable, y bandas de grano fino más máficas. De forma paralela al bandeamiento composicional hay esquistosidad y lineación por orientación de la hornblenda (Figura 3f).

Estas anfibolitas muestran rasgos de metamorfismo dinámico tales como bandas boudinadas, hornblendas oclares (“augen”) y agregados lenticulares de félsicos. A escala microscópica existen bandas de hornblenda que se abren y se cierran, que en parte bordean agregados lenticulares félsicos, y determinan una textura anastomosada. Los cristales gruesos de hornblenda están doblados y exhiben extinción ondulatoria, y las plagioclasas, aunque alteradas, denotan estar dobladas y acuñaadas. El cuarzo se presenta en agregados recristalizados dinámicamente en forma de cinta incipiente (“ribbon”).

Geoquímicamente, estas metabasitas guardan semejanza con las Anfibolitas de Medellín, especialmente en el contenido relativamente alto de Ti que se traduce en contenidos de esfena de hasta 4%. No obstante, las estructuras dinámicas recuerdan más a un cuerpo ígneo fanerítico deformado, rasgo semejante al encontrado en los Metagabros de El Picacho, cuya ubicación geográfica es cercana.

Contactos con otras unidades

Hay diques que intruyen las Anfibolitas de Boquerón cerca a la quebrada Seca, donde la metabasita presenta efectos térmicos que se atribuyen a la intrusión del Batolito de Ovejas, apófisis del Batolito Antioqueño, o del Stock de Altavista. Lamentablemente los contactos con las otras unidades adyacentes, como los Metagabros de El Picacho y las metasedimentitas de alto grado que afloran en el alto de Baldías, no fueron observados debido al gran depósito de vertiente que cubre la región.

Otros cuerpos de anfibolitas

Al norte de Boquerón, en el alto de Baldías, paquetes métricos a decamétricos de metasedimentitas, principalmente gneises cuarzo-feldespáticos con biotita, que localmente contienen granate o sillmanita, presentan al menos tres paquetes de anfibolitas intercaladas cuyo espesor puede llegar a 50 m. Se trata de anfibolitas con fuerte lineación, compuestas por hornblenda + plagioclasa +/- cuarzo +/- esfena. Algunas denotan efectos térmicos, ciertamente atribuibles a la intrusión del Batolito de Ovejas, con formación de albíta y epidota, y modificación de la fábrica a una más desordenada.

Hacia el sur, las Anfibolitas de Medellín se extienden hasta los municipios de El Retiro y La Ceja, en donde es común encontrar algo de granate o diópsido; su mineralogía detallada se describe en la tabla 1. Allí las metabasitas se encuentran como paquetes intercalados con esquistos micáceos a veces grafitosos, gneises y migmatitas. Estas últimas son relativamente abundantes en el lugar. Una zona de extensión limitada presenta granulitas básicas y granofelsas.

Estructuralmente, las anfibolitas en El Retiro y La Ceja pueden ser casi macizas hasta fuertemente lineadas (foliación nematoblástica, Figura 3g), y pueden mostrar reducción del cociente área/volumen de los granos. Se intentó determinar en un corte en la carretera Las Palmas, si existía límite tectónico entre las Anfibolitas de Medellín y aquellas de El Retiro. Al no encontrar evidencias de tal, se propone simplemente una variación lateral que incluye zonas con abundantes migmatitas en El Retiro, estas últimas también presentes en otros sitios, como Las Peñas o Alto de las Palmas, pero no en tan copiosa cantidad.

Otro cuerpo que se estudió en el marco de este trabajo se encuentra ubicado en el municipio de Barbosa e incluye anfibolitas y metasedimentitas, principalmente esquistos cuarzo-micáceos con grafito. El cuerpo es alargado en dirección NW y está bordeado completamente por el intrusivo Batolito Antioqueño. Las características encontradas en Barbosa permiten proponer una correlación con las Anfibolitas de Medellín y sus metasedimentitas asociadas.

Debe mencionarse que en los alrededores del municipio de Caldas, hay cuerpos de anfibolitas, algunas muy graníferas, y cuyas características mineralógicas y asociaciones son muy disímiles a las presentes en las Anfibolitas de Medellín y Metagabros de El Picacho. Las relaciones entre las metamorfitas en Caldas, que incluye gneises, anfibolitas graníferas, esquistos biotíticos con granate y estauroлита, esquistos cuarzomoscovíticos de bajo grado en facies esquisto verde y migmatitas de alto grado al E, aún no se comprenden plenamente, aunque recientemente **Montes** (2003) propone una transición gradual del grado metamórfico de W a E. Por sus notables diferencias y complejidad, las anfibolitas señaladas no se han tenido en cuenta para este trabajo.

Geoquímica

Los análisis químicos que a continuación se discuten fueron realizados en el Instituto de Geociencias de la Universidad de Brasilia (Brasil), bajo el convenio

existente entre esa universidad y la Universidad Nacional de Colombia.

Se analizaron 19 muestras de roca total para elementos mayores y traza (los análisis representativos se presentan en las tablas 2 y 3). Las concentraciones de los elementos mayores en la forma de óxidos (excepto Na₂O y K₂O) y de los elementos traza fueron determinadas por espectrometría de emisión con plasma (ICP-AES). La concentración de Na₂O y K₂O se determinó usando un espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer. La concentración de volátiles fue determinada a través de métodos gravimétricos y la concentración de Fe ferroso por volumetría.

Es importante considerar la posible movilidad de los elementos químicos de las metamafitas debido a procesos post-ígneos. Aunque no existen criterios definitivos para establecer el comportamiento de los elementos durante metamorfismo y meteorización (Grauch, 1989), diversos autores (e.g. Rollinson, 1993) citan elementos móviles e inmóviles ante diferentes procesos. Entre los inmóviles

están: las tierras raras pesadas, Y, Zr, Ti, Nb, P, Al, Co, Ni, V y Cr. Con el fin de observar si las rocas en cuestión presentan alteraciones químicas significativas de los elementos mayores, se construyeron algunos diagramas de Beswick & Soucie (1978) (Figura 4). En los diagramas 4a, 4b y 4c las muestras están alineadas y definen tendencias, lo que sugiere que las rocas no sufrieron alteraciones post-magmáticas importantes de los elementos involucrados. En el gráfico 4d la dispersión de los puntos indica movilidad, así por ejemplo, Ca y Na se movilizaron en relación con el K. La dispersión existente en varios diagramas de variación (Figura 7) también sustenta la interpretación anterior y sugiere movilidad de otros elementos mayores.

Resultados analíticos

De acuerdo con los datos geoquímicos obtenidos y según lo muestran los diagramas Sílice vs. Alcalis Total (Figura 5a y 5b), los protolitos de las Anfibolitas de Medellín y El Retiro correspondieron a rocas de composición basáltica, con carácter subalcalino y de afinidad

Tabla 2. Análisis representativos de elementos mayores para muestras de los Metagabros de El Picacho, las Anfibolitas de Boquerón, Medellín y El Retiro.

Grupo	Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PF	Total	# Mg
I	CMK-028A(AM-1)	49.65	0.46	14.85	0.77	5.16	0.10	11.87	12.02	2.30	0.36	0.05	1.77	99.36	64.60
	CMK-028B(AM-2)	44.72	0.29	21.07	1.55	2.87	0.06	8.65	15.61	1.37	0.28	0.05	2.63	99.15	64.60
	DM-2	46.76	0.26	16.51	1.65	5.19	0.09	12.77	12.34	1.87	0.24	0.03	1.35	99.06	63.26
	CMK-040	47.35	0.17	22.85	3.32	0.00	0.05	6.13	16.41	1.32	0.41	0.05	1.37	99.43	64.87
	CMK-101	47.47	0.60	15.04	6.30	0.00	0.11	13.57	13.81	1.66	0.41	0.06	0.52	99.55	68.29
II A	CMK-042A (AM-3)	52.77	1.19	13.89	1.17	7.83	0.15	7.47	9.79	3.33	0.28	0.12	1.03	99.02	43.07
	CMK-042B(AM-4)	48.99	1.45	16.63	1.09	8.84	0.14	6.64	8.14	4.15	0.32	0.16	1.89	98.44	37.83
	CMK-039(AM-6)	47.84	1.68	13.83	2.22	8.54	0.18	8.16	10.43	2.94	0.20	0.17	1.25	97.44	41.07
II B	CM-030A(AM-5)	48.61	1.71	15.61	1.53	7.80	0.17	8.87	9.94	3.66	0.32	0.09	0.81	99.12	46.52
	CMK-096B	48.20	1.77	16.34	8.91	0.00	0.18	10.41	8.45	3.09	0.57	0.14	0.39	98.45	53.88
	CMK-103	49.75	1.71	14.54	11.06	0.00	0.23	8.10	11.33	2.37	0.41	0.17	0.80	100.47	42.28
	CMK-105	51.10	1.70	13.90	9.16	0.00	0.15	8.93	10.11	3.30	0.41	0.12	0.88	99.76	49.36
	CMK-033A(AM-8)	44.98	0.97	18.86	1.09	7.64	0.16	7.45	14.62	2.37	0.48	0.12	2.06	100.80	43.74
	CMK-033B(AM-9)	48.61	1.40	14.78	1.85	7.43	0.14	8.80	11.01	3.11	0.20	0.14	1.72	99.19	46.54
	CMK-094	50.40	1.62	13.06	11.79	0.00	0.19	7.44	11.80	2.46	0.49	0.15	0.58	99.98	38.69
	CMK-074A	50.00	1.89	13.30	12.12	0.00	0.20	7.79	13.10	1.06	0.49	0.18	0.53	100.66	39.13
	CMK-044(AM-7)	49.67	1.33	14.19	1.68	8.62	0.18	8.57	9.96	2.67	0.24	0.15	0.97	98.23	43.22
III	CMK-045	48.85	2.43	11.22	2.1	11.94	0.23	6.65	10.26	2.68	0.57	0.22	0.19	98.69	30.22
	CMK-057	49.08	2.51	12.04	1.99	11.33	0.28	6.26	11.12	1.86	0.71	0.22	0.80	99.48	30.06

Óxidos expresados en porcentaje por peso (%). PF, pérdida por ignición.

Tabla 3. Análisis representativos de elementos traza para muestras de los Metagabros de El Picacho, las Anfibolitas de Boquerón, Medellín y El Retiro.

Grupo	Muestra	V	Ba	Sr	Nb	Zr	Y	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Ho	Er	Yb
I	CMK-028A(AM-1)	148	39	101	6.0	67	10	2.60	6.60	5.80	2.40	0.57	3.20	2.30	0.72	1.70	1.20
	CMK-028B(AM-2)	72	23	168	7.0	135	6	3.60	7.00	4.60	2.30	0.53	2.00	1.50	0.50	1.20	0.83
	DM-2	97	775	110	6.0	7	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	CMK-040	n.d	25	337	n.d	98	3	8.59	12.99	5.87	8.13	0.56	3.96	1.83	1.07	1.85	0.42
	CMK-101	n.d	21	81	n.d	164	13	5.81	10.12	6.47	8.00	0.85	4.79	3.66	1.60	3.08	1.32
II A	CMK-042A (AM-3)	210	49	130	9.0	41	21	3.60	10.40	8.40	4.20	0.88	5.60	4.20	1.10	3.20	2.50
	CMK-042B(AM-4)	204	67	214	10.0	48	26	3.80	9.10	8.00	3.00	0.97	6.50	5.30	1.00	3.40	3.10
	CMK-039(AM-6)	252	85	121	11.0	43	34	4.70	10.20	10.30	3.80	1.20	6.00	6.00	1.10	3.70	3.50
II B	CM-030A(AM-5)	231	41	114	16.0	148	24	2.20	5.60	6.10	1.80	0.83	5.10	4.20	0.93	2.70	2.60
	CMK-096B	n.d	37	108	n.d	45	33	6.17	14.25	11.49	9.66	1.39	6.51	6.41	2.08	4.52	3.01
	CMK-103	n.d	52	198	n.d	83	47	9.34	21.25	16.12	9.28	1.62	7.09	7.26	1.88	4.85	3.24
	CMK-105	n.d	26	141	n.d	106	32	4.93	11.77	11.15	7.10	1.17	4.65	5.52	1.44	3.84	2.58
	CMK-033A(AM-8)	198	58	164	8.0	98	21	3.30	5.20	4.90	2.00	0.95	4.60	4.00	0.68	2.30	2.20
	CMK-033B(AM-9)	203	36	121	9.0	69	24	3.10	6.80	7.70	2.70	1.00	5.50	4.70	0.87	2.90	2.70
	CMK-094	n.d	55	118	n.d	66	41	4.80	13.63	11.91	6.24	1.38	4.78	6.71	1.60	4.22	3.16
	CMK-074A	n.d	62	144	n.d	111	46	8.75	21.56	17.22	9.30	1.70	7.90	8.70	2.44	5.58	3.95
	CMK-044(AM-7)	196	88	185	12.0	71	22	5.20	12.40	9.60	2.80	1.10	6.10	4.50	0.84	2.80	2.70
III	CMK-045	n.d	111	269	n.d	129	49	15.37	35.00	23.66	15.09	2.49	10.57	10.14	2.6	6.16	4.27
	CMK-057	n.d	154	243	n.d	137	50	14.26	36.36	23.6	9.92	2.01	7.18	8.02	1.91	4.81	3.27

Elementos expresados en p.p.m. n.d.= no determinado.

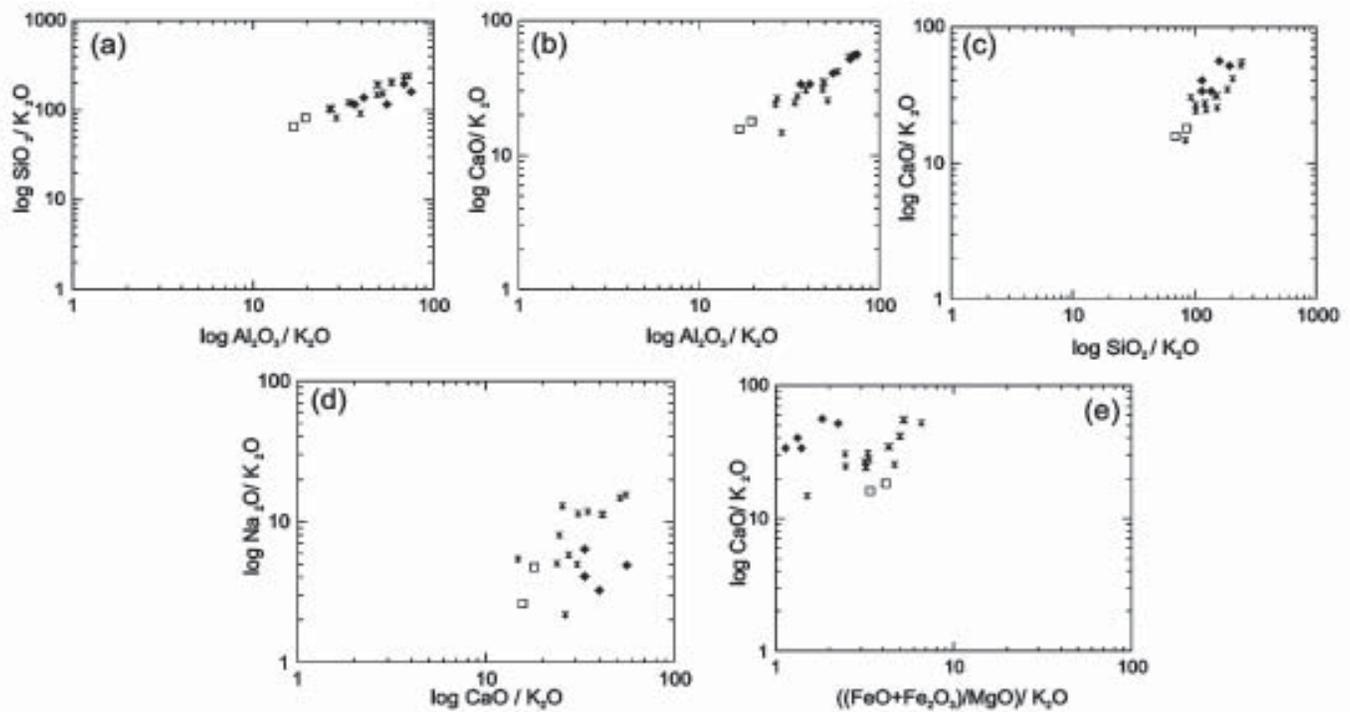


Figura 4. Diagramas de **Beswick & Soucie** (1978) para las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín. Símbolos: rombo lleno = metagabros de El Picacho, asterisco = anfibolitas de Medellín y Boquerón, cuadrado vacío = anfibolitas de El Retiro.

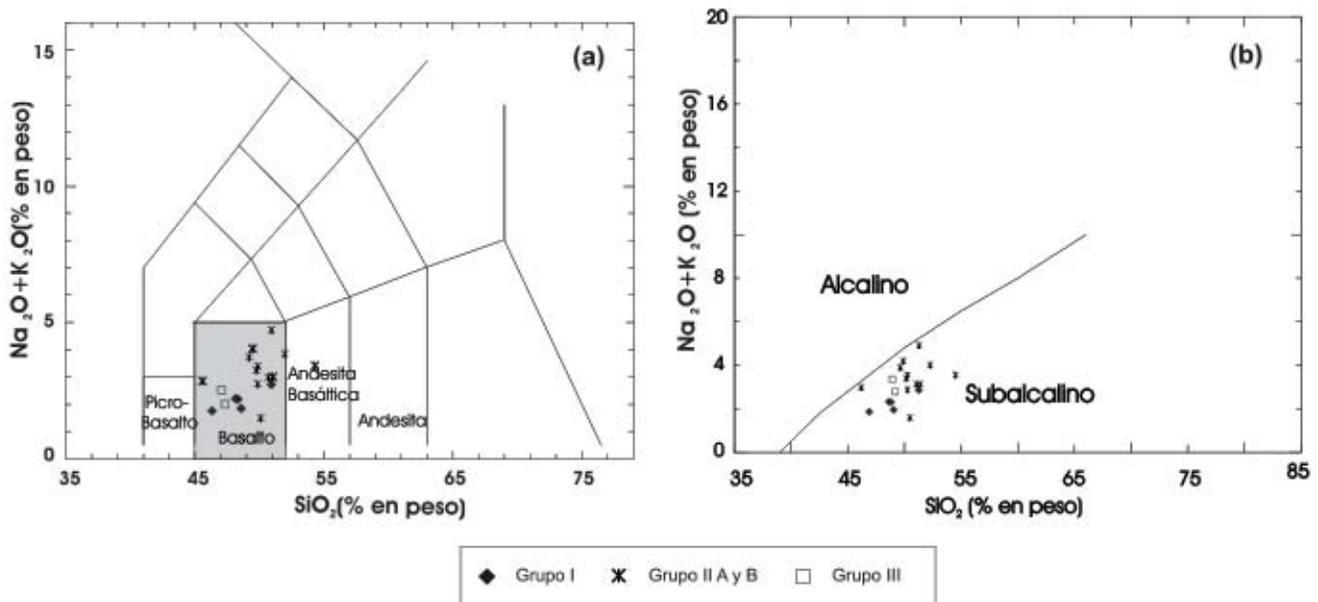


Figura 5. Diagrama sílice vs. álcalis total. (a) Diagrama según *Le Bas et al.* (1986) para clasificación de rocas volcánicas. (b) Campos alcalino y subalcalino de acuerdo con *Irvine & Baragar* (1971). Símbolos como en la figura 4

toleítica (Figura 6). Los protolitos de los metagabros de El Picacho fueron rocas gabroides (campo de basaltos en la figura 5a) de carácter subalcalino (Figura 5b).

Desde el punto de vista de los elementos mayores y traza es posible diferenciar tres grupos geoquímicos (ver

diagramas de variación de #Mg vs. otros elementos, en la figura 7): el Grupo I representa las características geoquímicas de la unidad Metagabros de El Picacho, el Grupo II incluye las muestras de las unidades Anfibolitas de Boquerón y de Medellín, y el Grupo III reúne las anfibolitas de El Retiro.

El Grupo I muestra una amplia variación de Al_2O_3 con valores desde 14.85 a 22.85, valores bajos de Fe_2O_3 (3.32 - 7.42), de MnO (0.5-0.11) y de TiO_2 (0.17-0.46). Estos valores de TiO_2 indican bajos contenidos de Ti en los piroxenos o anfíboles primarios y reflejan la ausencia o escasa presencia de ilmenita primaria.

Estas rocas presentan #Mg variables entre 63 y 69, mayores con respecto al Grupo II. El número de magnesio #Mg se calculó así: $[100 \times MgO / (MgO + Fe_2O_3^*)]$, siendo $Fe_2O_3^*$ el hierro total.

Los patrones de tierras raras (Figura 8a) y multielementales (Figura 9a) son irregulares, y no muestran tendencias que sean típicas de algún ambiente tectónico.

El Grupo II, con relación al Grupo I, muestra poca variación de Al_2O_3 desde 13.30 a 16.34, de $Fe_2O_3^*$ (>de 8%) y de MnO (0.14-0.23). Este grupo tiene un contenido más alto de TiO_2 , reflejo de la cantidad apreciable de esfena e ilmenita registradas en la petrografía. Los valores de #Mg son menores a los del Grupo I. La relación inversa entre el

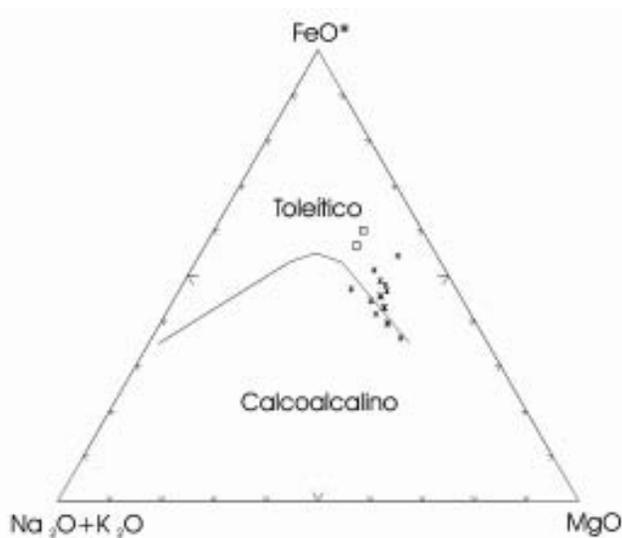


Figura 6. Diagrama AFM de *Irvine & Baragar* (1971) donde se observa la tendencia de cristalización toleíticas de las anfibolitas de Medellín, Boquerón y El Retiro. Símbolos como en la figura 4

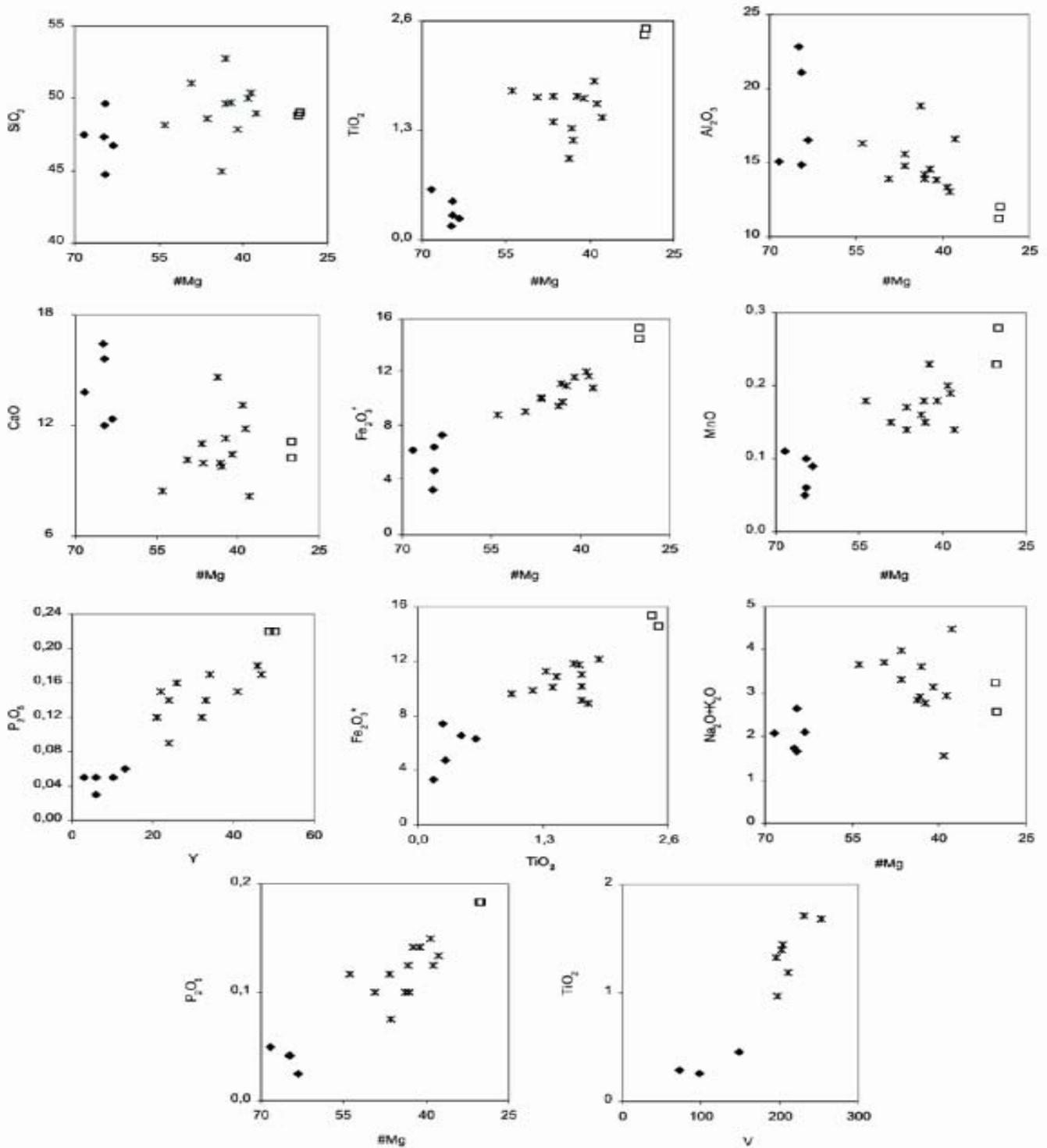


Figura 7. Diagramas de variación de #Mg con respecto a elementos mayores y diagramas entre algunos elementos traza. Símbolos como en la figura 4.

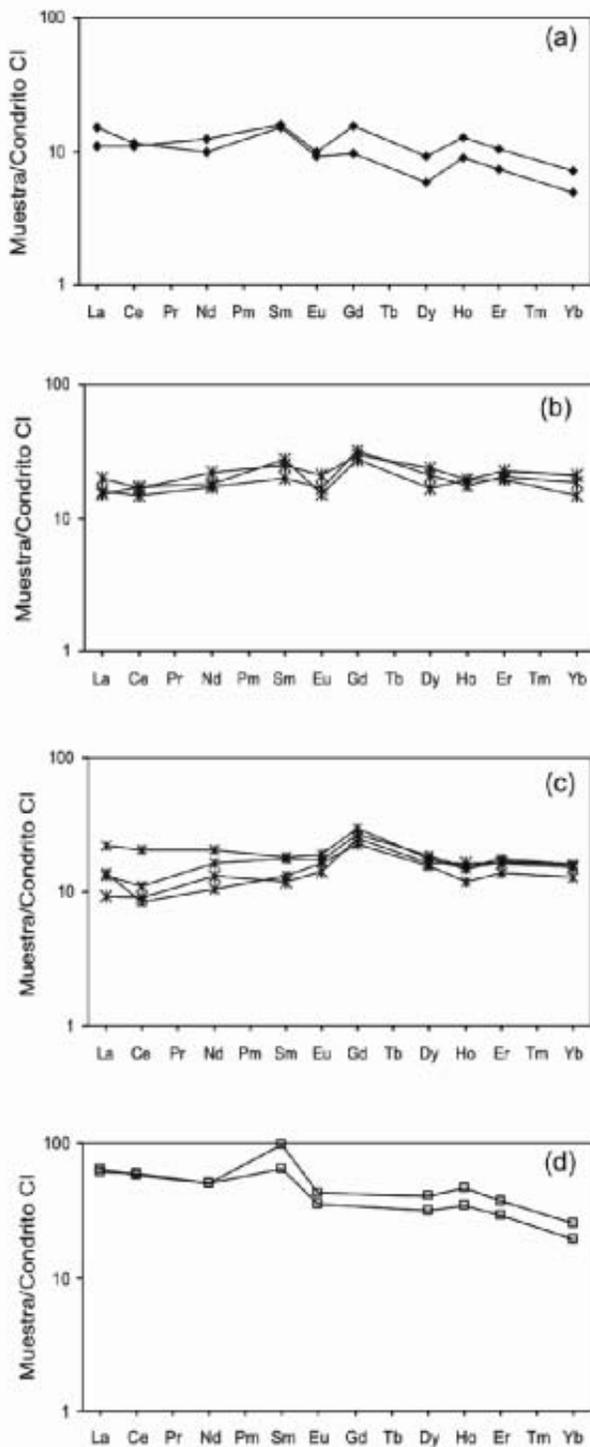


Figura 8. Patrones de elementos de las tierras raras de las unidades de metabasitas. (a)-Metagabros de El Picacho, (b)-Anfibolitas de Boquerón, (c)-Anfibolitas de Medellín, (d)-Anfibolitas de El Retiro. Valores normalizados contra el Condrito CI (Sun & McDonough, 1989).

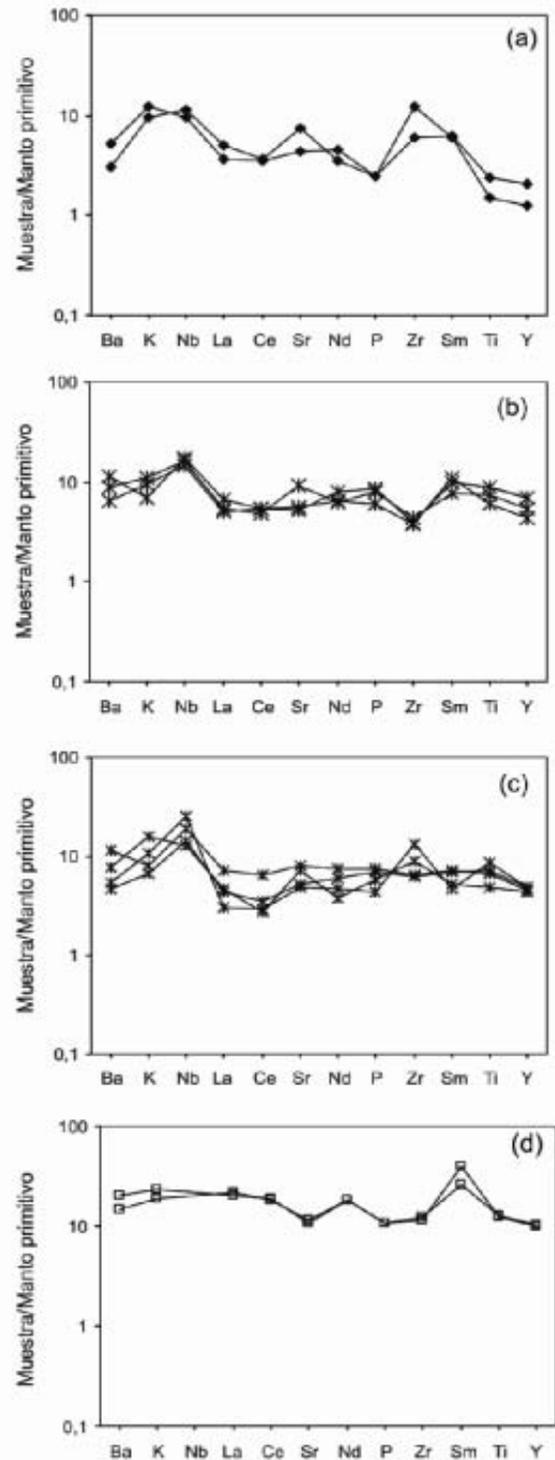


Figura 9. Diagramas multielementales de las unidades de metabasitas. (a)-Metagabros de El Picacho, (b)-Anfibolitas de Boquerón, (c)-Anfibolitas de Medellín, (d)-Anfibolitas de El Retiro. Valores normalizados con respecto al Manto primitivo (Wood *et al.*, 1979).

MgO y el Fe_2O_3^* , SiO_2 y MgO, y proporcional entre SiO_2 y Fe_2O_3^* sugiere que los magmas protolitos de estas rocas siguieron tendencias de cristalización toleítica, conclusión también obtenida a partir del diagrama AFM (Figura 6).

Las tendencias encontradas en los diagramas #Mg vs. P_2O_5 y Y vs. P_2O_5 (Figura 7) sugieren cristalización de apatito. Los diagramas de TiO_2 contra Fe_2O_3 y V contra TiO_2 indican la existencia de minerales tales como ilmenita.

Al considerar los elementos traza no existen muchas diferencias entre las muestras de anfibolitas, sin embargo dividimos el Grupo II en A (Anfibolitas de Boquerón) y B (Anfibolitas de Medellín). En el Grupo II A los patrones de distribución de REE (Figura 8b) son relativamente paralelos y planos, mientras que el Grupo II B exhibe un patrón de tierras raras con tendencia levemente positiva (Figura 8c). Las anfibolitas de Boquerón muestran una leve anomalía negativa de Eu que se puede explicar por fraccionamiento de plagioclasa. Dicha anomalía no es clara en las Anfibolitas de Medellín. Los patrones multielementales (Figuras 9b y c) también son paralelos en ambos subgrupos, siendo la diferencia más notable la anomalía negativa de Zr en las muestras del II A y positiva en dos del IIB.

Los patrones de tierras raras y aquellos de los diagramas multielementales, para el Grupo II, están comprendidos entre los patrones citados para toleítas de arco de isla y MORB, para el campo propuesto entre N-MORB y E-MORB por **Wilson** (1989).

El Grupo III presenta valores menores de Al_2O_3 y mayores de Fe_2O_3^* y de MnO que los otros dos grupos. También es el grupo con más alto contenido de TiO_2 . Los valores bajos de MgO y de #Mg (~30) sugieren que el protolito de estas rocas se generaron de magmas parentales diferenciados o más evolucionados que las fuentes de los otros dos grupos.

Los patrones de tierras raras son paralelos con pendiente negativa (Figura 8d) indicando enriquecimiento de las tierras raras livianas en relación con las pesadas, siendo ésta una característica que diferencia este grupo de los otros dos. Este patrón guarda semejanza con el presentado por basaltos de cuencas tras-arco, basaltos de arco de isla o por E-MORB. El patrón exhibido en los diagramas multielementales (Figura 9d) muestra enriquecimiento de casi todos los elementos en aproximadamente 30 veces con relación al manto primitivo, excepto el Sm que presenta una anomalía positiva alta.

Con miras a tener más información sobre el ambiente tectónico de los protolitos de las anfibolitas, se elaboraron varios diagramas discriminantes (Figura 10), en los cuales las rocas estudiadas caen dentro del campo MORB.

Las muestras de metagabros no aparecen en los diagramas porque son rocas gruesogranulares resultado de diferenciación magmática que no representan magmas parentales; estos diagramas sólo se pueden usar para rocas que muestren la afinidad de los magmas originales.

Geocronología

En el desarrollo de este trabajo se intentaron llevar a cabo dataciones Sm-Nd isócrona de granate y roca total en anfibolitas granatíferas y esquistos granatíferos de la carretera a Santa Elena (sector de El Guamo), la carretera Medellín-Bogotá (sector de Las Peñas) y del alto de Baldías. Lamentablemente los resultados no fueron satisfactorios; en algunos casos el granate no concentró suficientemente las tierras raras, y en otros, los resultados obtenidos no pudieron correlacionarse cronológicamente con las edades que se conocen para el basamento de la cordillera Central. Como no hay pruebas internas en este tipo de datación, que además se fundamenta en una isócrona de dos puntos, se decidió descartarlos de los resultados. También se intentó elaborar una isócrona de rocas totales con muestras de las unidades principales que se identificaron, pero los puntos no presentan suficiente dispersión en la isócrona para calcular una edad ígnea confiable.

No existen al momento dataciones de los Metagabros de El Picacho. Muestras recolectadas en El Boquerón fueron analizadas por **Martens & Dunlap** (en prep.), quienes intentaron una datación con el sistema Ar-Ar en hornblendas. El espectro resultó de difícil interpretación y dudosa validez, con edades que oscilan entre ca. 100-145 Ma. Será necesario esperar un trabajo geocronológico serio y extenso para determinar confiablemente la edad de los Metagabros de El Picacho y las Anfibolitas de Boquerón. Las Anfibolitas de Medellín, por el contrario, se han datado en varias oportunidades (**Restrepo et al.**, 1991 y referencias contenidas allí; **Martens & Dunlap**, 2003). Las abundantes edades cretácicas obtenidas se deben a perturbaciones térmicas originadas durante la intrusión del voluminoso Batolito Antioqueño; el metamorfismo orogénico se dio antes, probablemente durante el lapso Pérmico-Triásico. Este resultado es concordante con las edades K/Ar 251 +/- 21 Ma y Sm/Nd 226 +/- 17 Ma obtenidas en las granulitas y granofelsas asociadas de El Retiro (**Restrepo et al.**, 1991; **Ordóñez et al.**, 2001), y las dos fechas Ar-Ar de ca. 230 Ma obtenidas por **Vinasco et al.** (2001) en anfibolitas recolectadas en El Retiro durante la ejecución de este trabajo. Como se planteó anteriormente, es probable que las metamorfitas de alto grado de este lugar pertenezcan a una misma unidad junto con las rocas de alto grado de Medellín y por eso la correlación cronológica se considera válida.

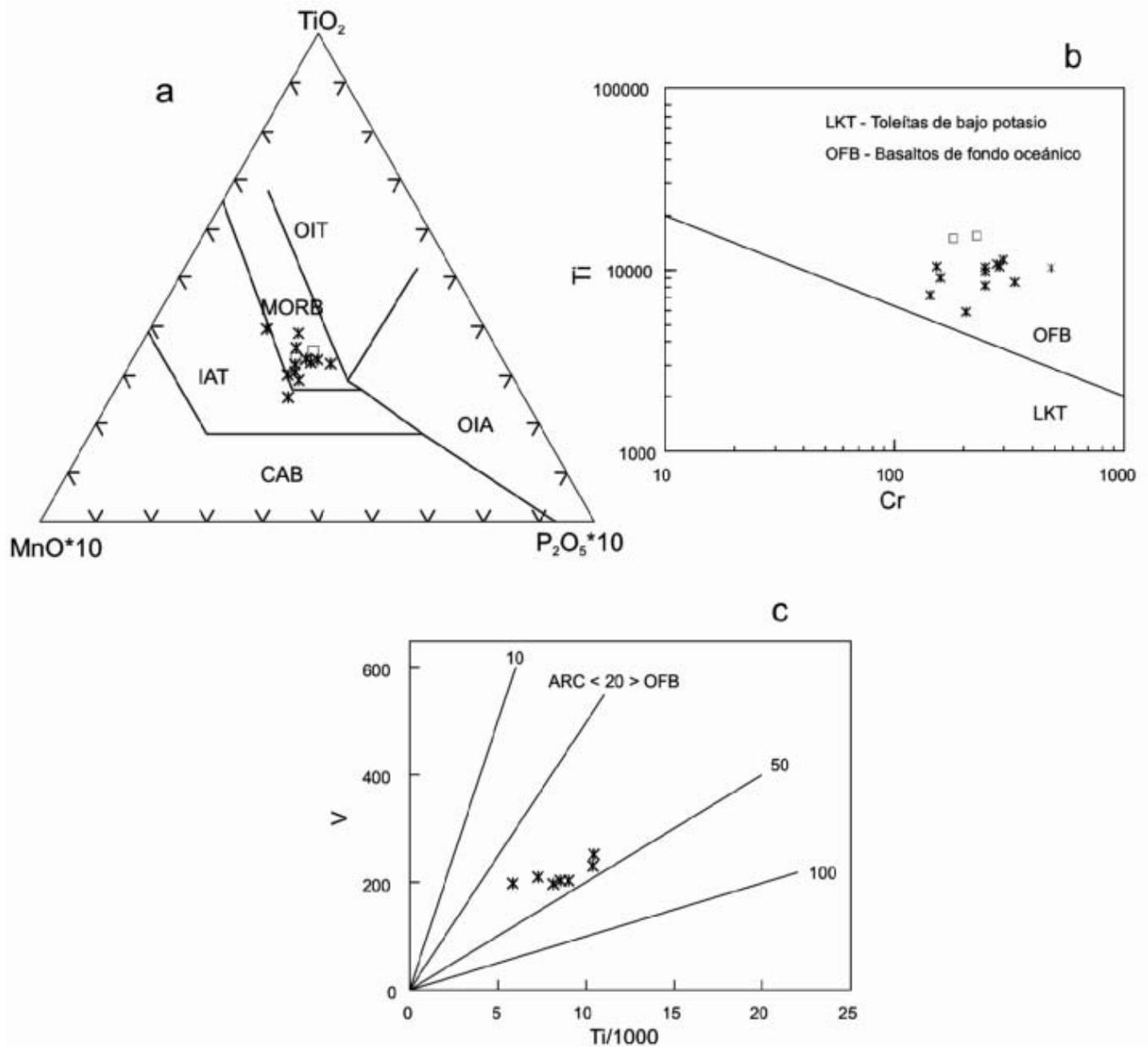


Figura 10. Diagramas discriminantes de ambientes tectónicos para las anfibolitas de Medellín, Boquerón y El Retiro. a) **Mullen** (1983). Campos: MORB-basaltos de dorsal medio-oceánica, OIT-toleítas de islas oceánicas, OIA- basaltos alcalinos de islas oceánicas, CAB-basaltos calcoalcalinos de arcos de isla, IAT-toleítas de arco de isla. b) **Pearce** (1975). c) **Shervais** (1982). Campos: ARC-basaltos de arco, OFB-basaltos de fondo oceánico. Símbolos como en la figura 4.

Discusión

Las notables diferencias geoquímicas, mineralógicas y estructurales descubiertas en las metabasitas de los alrededores de Medellín obligan a una subdivisión de éstas.

Los Metagabros de El Picacho muestran estructuras que revelan su protolito ígneo plutónico, como una unidad de gabros con estratificación ígnea. Este tipo de intrusiones bandeadas pueden presentarse en complejos estratificados (**Wager & Brown**, 1968) o como parte de la cámara magmática de ofiolitas (**Coleman**, 1977). Los va-

lores relativamente altos del #Mg indican que los magmas basálticos parentales eran poco evolucionados; sin embargo la información geoquímica es insuficiente para dar luz sobre el ambiente de formación y el tipo de manto del cual se derivaron. Como parte de un complejo ofiolítico, estas rocas se pudieron generar en varios ambientes como una dorsal medio-oceánica, una cuenca trasarco, una cuenca antearco, un arco de islas o un 'plateau' oceánico.

Los gabros fueron afectados por metamorfismo dinámico dúctil, que milonitizó variablemente las rocas. Éstas sufrieron posteriormente, o al final de la deformación dinámica, otro metamorfismo de tipo hidrotermal, a temperaturas correspondientes a la facies anfibolita. La alteración hidrotermal generó una disposición desordenada de anfíboles secundarios, principalmente clinofanfíboles verdes, que en algunas muestras están sobreimpuestos a la fábrica milonítica. Se propone que el metamorfismo dinámico se produjo durante el proceso de emplazamiento del fragmento de corteza oceánica sobre una corteza continental y el hidrotermal por la acción de fluidos y el calor residual de tal corteza.

Las Anfibolitas de Medellín, por su parte, no presentan texturas relictas de su protolito. El tamaño del cuerpo, la presencia de grafito en algunos paquetes de anfibolitas y la asociación local con metasedimentitas sin rocas calcáreas, sugiere un origen ígneo volcánico. La intercalación milimétrica a centimétrica de anfibolitas y metasedimentitas indica sedimentación y vulcanismo contemporáneos.

La geoquímica indica que se trata de metabasitas con una tendencia de cristalización toleítica y que la fuente pudo corresponder a un magma intermedio entre aquellos que generan los basaltos N-MORB y E-MORB. Los ambientes más probables de formación para esta unidad son una cuenca tras-arco o una dorsal oceánica con aporte de sedimentos continentales. En una cuenca tras-arco los basaltos generados pueden tener características geoquímicas similares a las de un MORB (Wilson, 1989). En el caso de que haya sido este el ambiente de generación, se trató de una cuenca evolucionada muy alejada de la zona de subducción, pues no se aprecian los rasgos geoquímicos propios de ésta, como anomalías negativas de Nb y enriquecimiento en tierras raras livianas.

El conjunto de basaltos y sedimentitas se metamorfizó en facies anfibolita durante un metamorfismo orogénico; no hay evidencias de metamorfismo hidrotermal o dinámico que afecte de manera global a la unidad. Si bien estas anfibolitas tienen fábrica lineal, ésta es por la disposición de los anfíboles columnares que sintectónicamente

crecieron disponiéndose de manera casi paralela (foliación nematoblástica), y no por un cizallamiento posterior a la formación de la metamorfita. No se descubre el anastomosamiento y las estructuras típicas de las rocas fuertemente deformadas dúctilmente. La mineralogía indica condiciones de metamorfismo de más alto grado que en los Metagabros de El Picacho, incluso en la transición de la facies de anfibolitas a la de granulitas.

Otra unidad importante, pero de limitada extensión, son las Anfibolitas de Boquerón, compuestas por metabasitas de grano medio en facies de anfibolita, posiblemente baja, que contienen abundante esfena. Las rocas tienen bandeado composicional, foliación en la que predomina la esquistosidad sobre la lineación, evidencias de metamorfismo dinámico y minerales secundarios como anfíboles aciculares desordenados, epidota y esfena. Los rasgos estructurales sugieren correlación con los Metagabros de El Picacho, pero su geoquímica es semejante a la de las Anfibolitas de Medellín.

Por otro lado, las anfibolitas de El Retiro comparten características de campo, petrográficas y de condiciones metamórficas con las Anfibolitas de Medellín, pero presentan algunas diferencias geoquímicas con éstas. Así, el #Mg es más bajo y los patrones de tierras raras muestran leve enriquecimiento en elementos de las tierras raras livianas lo que sugiere que el protolito correspondió a magmas parentales diferenciados o más evolucionados que las fuentes de las Anfibolitas de Medellín. No obstante es necesario realizar estudios geoquímicos detallados para determinar si esas variaciones geoquímicas se pueden explicar a través de un proceso de diferenciación magmática o si indican magmas diferentes para las Anfibolitas de Medellín y El Retiro. Aún se desconoce si los protolitos de estas anfibolitas estuvieron relacionados espacial y temporalmente.

La asociación en los alrededores de Medellín de las metabasitas descritas junto con cuerpos ultramáficos, invita a considerar la existencia de un complejo ofiolítico. Las ultramafitas, principalmente dunitas, provendrían del manto litosférico; los metagabros se habrían derivado de los gabros bandeados de una cámara magmática en la parte intermedia de la ofiolita; y las anfibolitas sin rasgos relictos que están asociadas a metasedimentitas serían la parte superior de la ofiolita, donde basaltos, doleritas y sedimentos se habrían metamorfizado bajo condiciones de alto grado. Incluso el límite tectónico que separa las unidades no sería de extrañar, ya que en muchos ejemplos de ofiolitas en el mundo, éstas se presentan desmembradas como bloques dispersos limitados tectónicamente (anónimo, 1972).

No obstante, es necesario ser precavidos con esta interpretación, ya que las características encontradas en los Metagabros de El Picacho y las Anfibolitas de Medellín, sugieren una historia metamórfica disímil para cada unidad. Los Metagabros de El Picacho tienen texturas ígneas relictuales, evidencias de cizallamientos fuertes y alteración hidrotermal que genera texturas desordenadas. Ninguno de estos rasgos está presente en las Anfibolitas de Medellín, que en cambio, presentan fábrica sintectónica de un metamorfismo orogénico, asociaciones minerales que indican alto grado incluso alcanzando la transición a la facies de granulitas, y una cantidad notablemente superior de esfenas.

Preferimos, por esto, proponer dos conjuntos principales: uno ofiolítico, compuesto por las ultramafitas y los metagabros, para el que se propone el nombre *Complejo Ofiolítico de Aburrá*, y otro, compuesto por las Anfibolitas de Medellín (s.s.) y los gneises de alto grado asociados.

Los conjuntos propuestos pueden extenderse para incluir otras litologías de los alrededores de la ciudad. El Gneis de la Iguañá (**Restrepo & Toussaint**, 1982), ubicado en el sector del mismo nombre (Figura 1), se ha correlacionado con gneises paleozoicos de la cordillera Central. En nuestra opinión debería estudiarse con más detalle para establecer si, por el contrario, hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá. Este cuerpo corresponde a un granitoide milonitizado, de coloración clara, constituido principalmente por plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico en la mayoría de muestras, poca biotita, grandes cristales de epidota, y zircón como accesorio, con una fábrica lineada-milonítica. Si bien su composición parece ser relativamente ácida, las estructuras que tiene son muy semejantes a aquellas presentes en los Metagabros de El Picacho, los cuales están asociados espacialmente con el gneis.

Hacia el sur, las Anfibolitas de Medellín y las metasedimentitas de alto grado se extienden a las poblaciones de El Retiro y La Ceja, pero allí no se han registrado, al momento, cuerpos de extensión considerable de ultramafitas o de metagabros. No se conoce ningún sistema de fallas importante que separe las unidades de este lugar de las Anfibolitas de Medellín, y en nuestra opinión, al menos las anfibolitas de uno y otro lugar, deberían considerarse un solo cuerpo. También hay una prolongación de las anfibolitas hacia el norte que llega al menos hasta Belmira.

Parece razonable incluir por grado metamórfico otros cuerpos metasedimentarios de alto grado, en conjunto con las Anfibolitas de Medellín y sus extensiones. Destacan las rocas del alto de Baldías, los gneises y migmatitas al

sur de Envigado, y las migmatitas en El Retiro. Ya **Echeverría** (1973) había propuesto una subdivisión semejante al definir la Zona La Ayurá, si bien su interpretación tiene significativas diferencias con la nuestra.

La información geocronológica que se tiene hasta el presente es insuficiente para determinar si las Anfibolitas de Medellín y los Metagabros de El Picacho conforman un único complejo ofiolítico contemporáneo que fue desmembrado. Con la información existente son concebibles dos escenarios. En uno, un fragmento basal de corteza oceánica y otro de manto litosférico de edad incierta (Dunita de Medellín + Metagabros de El Picacho) se emplazan sobre un extenso cinturón metamórfico, que incluye anfibolitas, después de que éste fue generado en un metamorfismo orogénico Pérmico-Triásico y antes de la intrusión del Batolito Antioqueño en el Cretácico. En este caso el Complejo Ofiolítico de Aburrá estaría formado exclusivamente por las ultramafitas y los metagabros bandeados de los alrededores de Medellín. Una segunda propuesta, desarrollada recientemente por **Restrepo** (2003), plantea un metamorfismo Pérmico-Triásico conjunto entre Anfibolitas y Dunitas de Medellín, durante el que no sólo ultramafitas y metagabros, sino también las Anfibolitas de Medellín, se habrían emplazado sobre un basamento metamórfico más antiguo.

Conclusión

En este estudio se descubrió que algunos cuerpos de metabasitas en los alrededores de Medellín corresponden a intrusiones ígneas bandeadas que fueron metamorfoseadas dinámicamente, luego hidrotermalizadas, y cuya geoquímica, mineralogía y estructuras particulares, hacen necesario separarlas en una nueva unidad litoestratigráfica cuyo nombre se propone sea Metagabros de El Picacho. Estas metabasitas deben considerarse aparte de la unidad Anfibolitas de Medellín, compuesta por metavulcanitas y metasedimentitas subordinadas, y que se formaron durante un metamorfismo orogénico de alto grado.

Los Metagabros pueden agruparse junto con las Dunitas de Medellín en una unidad que aquí se define como Complejo Ofiolítico de Aburrá, y que corresponde a la parte basal de una corteza oceánica cuyo ambiente de generación aún no se conoce. Queda por verse si las Anfibolitas de Medellín hacen parte del mismo complejo, pues si bien puede tratarse de la parte superior de la ofiolita metamorfoseada bajo condiciones de alto grado, hay muchas diferencias, especialmente en la sucesión y tipo de eventos metamórficos, que sugieren dos historias geológicas disímiles para cada unidad de metabasitas.

Los datos que actualmente se tienen de las Anfibolitas de Boquerón son insuficientes para dilucidar su origen, y su correlación es aún incierta. Las Anfibolitas de El Retiro se consideran extensiones laterales hacia el sur de las Anfibolitas de Medellín aunque sus rasgos geoquímicos y el tipo de metasedimentitas asociadas son un tanto disímiles.

La información geocronológica disponible indica que el metamorfismo de alto grado de las Anfibolitas de Medellín y de El Retiro se dio durante el lapso Pérmico-Triásico. La edad de los Metagabros de El Picacho, y en general, del Complejo Ofiolítico de Aburrá, no ha sido determinada. El emplazamiento del complejo ofiolítico pudo darse asociado con el metamorfismo Pérmico-Triásico citado, o bien, posteriormente.

Agradecimientos

Queremos agradecer al CIMEX y al Centro del Carbón de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, y al laboratorio de trazas de fisión de la Universidad EAFIT (Medellín) por permitir la preparación de muestras, y a los laboratorios de Geoquímica y Geocronología de la Universidad de Brasilia (Brasil) por la ejecución de los análisis químicos. Agradecimiento especial a todos nuestros amigos, geólogos o no, por acompañarnos a las excursiones de campo. Al geólogo Álvaro Nivia por la ayuda brindada en la interpretación de los datos geoquímicos.

Los dos primeros autores agradecen especialmente a los profesores Jorge Julián Restrepo y Oswaldo Ordóñez-Carmona por la orientación del trabajo dirigido de grado que dio origen a este artículo.

Bibliografía

- Álvarez, J., 1987. Tectonitas dunitas de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico Ingeominas*. **28** (3): 9-44.
- Anónimo, 1972. Penrose Field Conference on ophiolites. *Geotimes*, **17** (12): 24-25.
- Beswick, A.E. & Soucie, G., 1978. A correction procedure for metasomatism in an Archean greenstone belt. *Precambrian Res.* **6**: 235-248.
- Botero, G., 1963. Contribución al conocimiento geológico de la zona central de Antioquia. En: *Anales de la Facultad de Minas*. (57): 1-101.
- Bucher, K. & Frey, M., 2002. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer Verlag, Berlin. 318 p.
- Coleman, R.G., 1977. Ophiolites. Ancient Oceanic Lithosphere? SpringerVerlag, Berlin. 229 p.
- Estrada-Carmona, J., 2003. Caracterización geológica de las rocas metamórficas en los alrededores de la cuchilla Las Peñas. Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín. Tesis (inédita). 91 p.
- Echeverría, L.M., 1973. Zonación de las rocas metamórficas del valle de Aburrá y sus alrededores. En: *Anales de la Facultad de Minas*. (58): 30-56.
- Grauch, R.I., 1989. Rare earth elements in metamorphic rocks. En: *Reviews in Mineralogy*. **21**: 147-167.
- INGEOMINAS, 1996. Memoria explicativa del mapa geológico generalizado del departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Medellín.
- _____. 1997. Mapa geológico generalizado del departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Medellín.
- Irvine, T. N. & Baragar, W. R., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. En: *Can. J. Earth Sci.* **8**: 523-548
- Le Bas M. J., Le Maitre R. W., Streckeisen A. & Zanettin B., 1986 - A chemical classification of volcanic rocks based on the Total Alkali-Silica Diagram. *J. Petrol.*, **27**: 745-750
- Martens, U. & Dunlap, W.J., 2003. Características del metamorfismo Cretácico del terreno Tahamí como se infiere a partir de edades Ar/Ar obtenidas en las Anfibolitas de Medellín, cordillera Central de Colombia (resumen). En: *Memorias IX Congreso Colombiano de Geología*. Medellín: 47-48.
- McCourt, W. J., Aspden, J. A. & Brook, M., 1984. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. *J. Geol. Soc. London*. **141**: 831-845.
- Miyashiro, A., 1994. *Metamorphic petrology*. Oxford University Press, Londres. 404 p.
- Montes, L.F., 2003. Relación entre las metamorfitas de alto y bajo grado en el sur del valle de Aburrá. IX Congreso Colombiano de Geología, Medellín (resúmenes).
- Mullen, E. D., 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters* **62**: 53-62.
- Ordóñez, O., 2001. Caracterização isotópica Rb-Sr e Sm-Nd dos principais eventos magmáticos nos Andes Colombianos. Tesis de Doctorado (inédita). Universidad de Brasilia. 176 p.
- _____. Pimentel, M., Correa, A.M., Martens, U., Restrepo, J.J., 2001. Edad Sm/Nd del metamorfismo de alto grado de El Retiro (Antioquia). En: VIII Congreso Colombiano de Geología, Manizales (C.D.).
- Pearce, J. A., 1975. Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. *Tectonophysics* **25**: 41-67
- Rendón, D. A., 1999. Cartografía y caracterización de las unidades geológicas del área urbana de Medellín. Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín. Tesis de grado (inédita).
- Restrepo, J. J., 1986. Metamorfismo en el sector norte de la Cordillera Central de Colombia. Universidad Nacional, Facultad de Ciencias, Medellín. 276 p.

- _____. 2003. Edad de generación y emplazamiento de ofiolitas en la cordillera Central: un replanteamiento (resumen). En: Memorias IX Congreso Colombiano de Geología. Medellín: 48-49.
- _____. & **Toussaint, J. F.**, 1974. Obducción Cretácica en el Occidente Colombiano. Anales de la Facultad de Minas. (58): 73-105.
- _____. 1978. Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia, Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra. (5-6): 1-18.
- _____. 1982. Metamorfismos superpuestos en la Cordillera Central de Colombia. En: Actas del V Congreso Latinoamericano de Geología. 3: 505-512.
- _____. 1984. Unidades litológicas de los alrededores de Medellín. En: Conferencia sobre riesgos geológicos del valle de Aburrá: 1-26.
- Restrepo A. J.J., Toussaint, J.F., González, H., Cordani, U., Kawashita, K., Linares, E. & Parica, C.**, 1991. Precisiones geocronológicas sobre el Occidente Colombiano. En: Simposio sobre magmatismo andino y su marco tectónico. Manizales. 1: 1-21.
- Rollinson, H.**, 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group, Essex. 352p.
- Shervais, J.W.**, 1982. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. Earth Planet. Science Lett., **59** (1): 101-118.
- Sun, S.-s., McDonough, W.F.**, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En: Saunders, A.D. & Norry, M.J. (eds.), Magmatism in the Oceanic Basins. Geological Society of America Special Publication **42**: 313 – 345.
- Tamayo, L.M.**, 1984. Análisis y mediciones de miniestructuras en la anfibolita del Grupo Ayurá-Montebello. Medellín, Universidad Nacional, Facultad de Minas. Tesis de grado (inérita).
- Toussaint, J. F.**, 1996. Evolución Geológica de Colombia 3: Cretácico. Universidad Nacional, Facultad de Minas, Medellín. 277p.
- Vinasco, C., Cordani, U., González, H., Vasconcelos, P., Liu, D.**, 2003. Tectonomagmatic evolution of the northern part of the Central Cordillera of Colombia using Ar-Ar and U-Pb Shrimp methodologies (resumen). En: Memorias IX Congreso Colombiano de Geología. Medellín: 57-58.
- Vinasco, C.J., Cordani, U.G., Vasconcelos, P.**, 2001. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates in the Central Cordillera of Colombia: evidence for an upper Triassic regional tectonomagmatic event. En: III Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Pucón - Chile.
- Wager, L.R. & Brown, G.M.**, 1968. Layered igneous rocks. W.H. Freeman, San Francisco. 588 p.
- Wilson, M.**, 1989. Igneous petrogenesis. Chapman & Hall, Londres. 466 p.
- Wood, D.A., Tarney, J., Varet, J., Saunders, A.D., Bougault, H., Joron, J.-L., Treuil, M. and Cann, J.R.**, 1979. Geochemistry of basalts drilling in the North Atlantic by IPOD Leg 49: implications for mantle heterogeneity. Earth Planet. Sci. Lett., **42**: 77-97.

Recibido el 4 e octubre de 2004.

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2005.

LOS MAMÍFEROS FÓSILES Y LAS EDADES DE LAS SEDIMENTITAS CONTINENTALES DEL NEÓGENO DE LA COSTA CARIBE COLOMBIANA

por

Carlos Villarroel A.¹ & Jairo Clavijo²

Resumen

Villarroel A., C. & J. Clavijo. Los mamíferos fósiles y las edades de las sedimentitas continentales del Neógeno de la Costa Caribe Colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **29** (112): 345-356. 2005. ISSN 0370-3908.

Se estudian y describen restos de cinco mamíferos fósiles continentales de la Costa Caribe Colombiana: *Neoglyptatelus sincelejanus* n. sp. (Glyptodontidae, Glyptatelinae), *?Gyriabrus royoi* (Rodentia, Dinomyidae), *Mixotoxodon larensis* (Toxodontidae, Toxodontinae), un Toxodontidae indet. y *Haplomastodon waringi* (Gomphotheriidae). Sus ubicaciones geográficas y sus respectivas edades hacen posible considerar y discutir aspectos nomenclaturales y cronoestratigráficos de algunas unidades litoestratigráficas neogénicas aflorantes en la región.

Palabras clave: *Neoglyptatelus*, *?Gyriabrus*, *Mixotoxodon*, Toxodontidae indet., *Haplomastodon*, litoestratigrafía, Caribe, Colombia.

Abstract

We describe five different continental mammalian fossils found on the Colombian Caribbean Coast: *Neoglyptatelus sincelejanus* n. sp. (Glyptodontidae, Glyptatelinae), *?Gyriabrus royoi* (Rodentia, Dinomyidae), *Mixotoxodon larensis* (Toxodontidae, Toxodontinae), Toxodontidae indet. and *Haplomastodon waringi* (Gomphotheriidae). Their geographical situations and their corresponding ages allow the discussion of nomenclatural and chronostratigraphic aspects of some litostratigraphical units exposed in the that region.

Key words: *Neoglyptatelus*, *?Gyriabrus*, *Mixotoxodon*, Toxodontidae indet., *Haplomastodon*, litoestratigrafía, Caribe, Colombia.

¹ Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, A. A. 14490, Bogotá, Colombia.

² INGEOMINAS, Bucaramanga, Colombia.

Introducción

Se han realizado varios intentos para organizar las sedimentitas continentales de la Costa Caribe Colombiana. En esta tarea, como se observa en el Cuadro 1, prácticamente cada autor utiliza un esquema estratigráfico diferente, en el que, además de emplear nombres diferentes para las mismas unidades litoestratigráficas, a cada una de estas se les atribuye edades diferentes, lo que da lugar a que actualmente no exista un esquema que refleje la ocurrencia ordenada de los diferentes eventos tectono-sedimentarios que se han sucedido en la región. Entendemos que la superación de estas deficiencias debe basarse tanto en el estudio sistemático y detallado de las diferentes unidades litoestratigráficas aflorantes como el análisis de perfiles sísmicos, los que deben acompañarse por dataciones que hagan posible el ordenamiento cronológico de las unidades así como el establecimiento y caracterización de eventos tectónicos que pudieron ocurrir en la región.

En este orden de ideas, creemos que la bioestratigrafía basada en el estudio de los mamíferos fósiles continentales constituye uno de métodos a aplicar, lo que no sólo facilitaría el ordenamiento temporal de las sedimentitas continentales aflorantes sino que también proporcionaría información relacionada con los ambientes de depósito. En la actualidad se conocen unos pocos hallazgos que, a pesar de ser aislados y casuales constituyen un ejemplo del aporte que podría brindar la búsqueda sistemática de mamíferos fósiles en la solución de problemas crono-estratigráficos, además de aquellos puramente taxonómicos, evolutivos, paleobiogeográficos y paleoambientales.

En este trabajo se presenta un recuento y la descripción de los principales especímenes (estableciendo, con la mayor precisión posible, la ubicación geográfica y estratigráfica de cada uno de ellos), para luego, sobre esa base, adelantar algunas consideraciones estratigráficas relacionadas con las sedimentitas portadoras de fósiles.

Taxonomía

- Orden CINGULATA Illiger, 1811
- Superfamilia Glyptodontoidea BURMEISTER, 1879
- Familia Glyptodontidae BURMEISTER, 1879
- Subfamilia Glyptatelinae CASTELLANOS, 1932
- Género *Neoglyptatelus* Carlini, Vizcaíno & Scillato-Yané, 1997

Neoglyptatelus sincelejanus n. sp

Holotipo: No. JC 529454 A (número de etiqueta de campo. El total de piezas corresponde a un sólo indivi-

duo, pero, con el objeto de facilitar su identificación, a cada una de ellas se le ha añadido un número) Fragmentos de caparazón que encajan unos con otros, sólo el tubo caudal, marcado con el número JC 529454 A-4, no muestra una clara conexión con las otras piezas, aunque es seguro que pertenece al mismo individuo, ya que fue encontrado junto con las partes del caparazón. Casi todas las piezas muestran los efectos del fuerte tectonismo que sufrieron las sedimentitas portadoras.

No. JC 529454 A-1: Parte dorsal de caparazón, está bien preservada (Lámina I: A y B).

No. JC 529454 A-2: Dos fragmentos de caparazón, ambos deformados, corresponden a los costados izquierdo y derecho. Una capa de areniscas gris verdosas separa ambas piezas (Lámina I: C)

No. JC 529454 A-3: Dos vértebras y un fragmento de caparazón (contenidos en un pedazo de arenisca gris verdosa); el último prolonga por detrás el fragmento de caparazón del lado derecho de JC 529454 A-2.

No. JC 529454 A-4: Tubo caudal con las primeras seis bandas móviles y la hilera anterior de la séptima, está algo deformado. Muchas placas se han desprendido y perdido (Lámina I: D)

Repositorio: Colecciones Paleontológicas del Museo "José Royo y Gómez" del INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.

Diagnosis: *Neoglyptatelus sincelejanus* es bastante semejante a *N. originalis* Carlini, Vizcaíno & Scillato-Yané, 1997. Las diferencias más importantes que se observan son: tamaño algo menor; placas del caparazón ligeramente más pequeñas y delgadas; la escultura externa de las placas está poco marcada, como consecuencia las figuras centrales, lo mismo que las periféricas, son casi planas; los forámenes pilíferos, en número de 1 a 3 por placa, son más pequeños que en *N. originalis*.

Derivatio nominis: El nombre específico hace referencia a Sincelejo, capital del Departamento Sucre, costa Caribe colombiana.

Localización geográfica y ubicación estratigráfica: La etiqueta que acompaña al material que se describe indica que fue recolectado el 15 de agosto de 1994, en el "camino Calle Fría-Segovia, adelante de la Finca La Peña". El sitio se ubica 6 Km al sur de la ciudad de Sincelejo (Fig. 1)

Según el geólogo **J. Clavijo**, el material holotípico fue recolectado en la parte superior de la Formación Sincelejo, dentro de niveles de areniscas verde claras. No

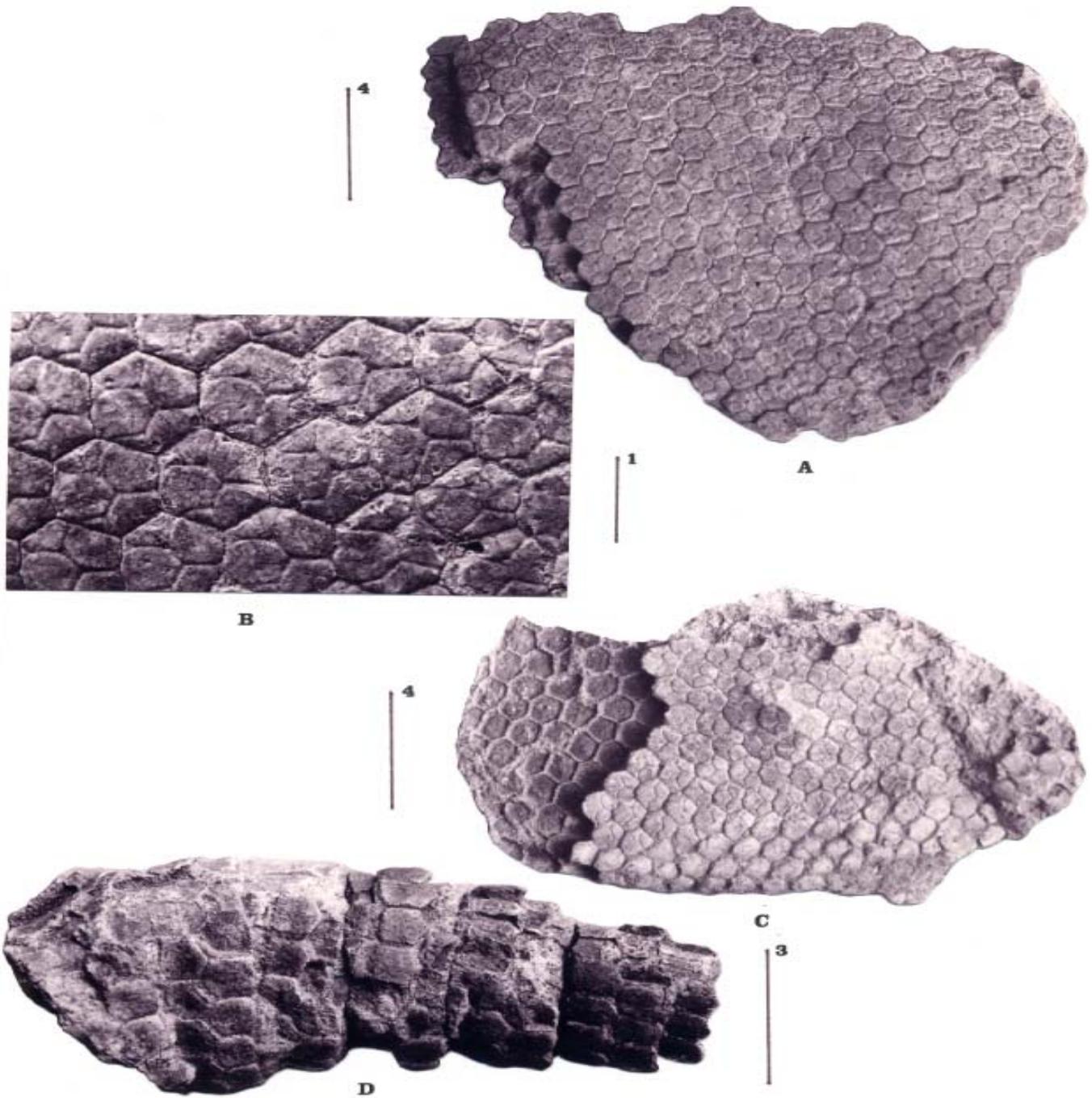


Lámina I: *Neoglyptatelus sincelejanus* n. sp. Holotipo (Escala en centímetros). A.- JC 529454 A-1: Fragmento dorsal de caparazón. La Parte anterior del animal se ubica hacia la izquierda. B.- JC 529454 A-1: Ampliación de un segmento de caparazón donde se muestra la forma de las placas y la relación entre la figura central y las periféricas. C.- JC 529454 A-2: Fragmento del costado derecho del caparazón. La parte anterior del animal se ubica hacia la derecha. D.- JC 529454 A-4: Vista lateral izquierda de la parte anterior del tubo caudal. La parte anterior del animal se encuentra hacia la izquierda.



Figura 1. Mapa de ubicación de lugares que se mencionan en el texto y sitios con restos de mamíferos fósiles que se estudian: 1: *Neoglyptatelus sincelejanus*, 2: *Trigodonops* y *Toxodontidae* indet. de Los Palmitos, 3: *?Gyriabrus royo*, 4: *Mixotoxodon larensis* y 5: *Haplomastodon waringi*

obstante, como se muestra en el Cuadro 1, los niveles portadores del fósil pueden corresponder a unidades litoestratigráficas diferentes de la Formación Sincelajo, la misma que varía según el esquema estratigráfico que emplea cada autor.

Edad: *Neoglyptatelus originalis* es un gliptodóntido que hace parte de la Fauna de La Venta. Los estudios de esta fauna y los de las unidades litoestratigráficas en las que se encuentran (formaciones La Victoria y Villavieja del Grupo Honda), y que afloran en el “desierto” de La Tatacoa (subcuenca de Neiva, Valle Superior del Magdalena), han servido de base para la proposición del Piso Laventense (Madden *et al.*, 1997), que ha sido incluido en la Escala de Edades-Mamífero de Sudamérica. Los análisis paleontológicos, radiométricos y magnetoestratigráficos establecen

que el Laventense se extiende de 12.8 a 11.8 Ma., correspondiendo al Piso Serravaliense del Mioceno Medio Tardío (Flynn & Swisher, 1995). En este contexto, la semejanza existente entre *N. originalis* y *N. sincelejanus* permite admitir una coetaneidad entre estas especies, lo que a su vez hace posible referir las sedimentitas portadoras de *N. sincelejanus* al Mioceno Medio Tardío.

Descripción comparativa: De manera general, las dos especies colombianas de Glyptateliné son pequeñas y morfológicamente diferentes de las argentinas, es decir *Glyptatelus tatusinus* Ameghino, 1897, *Glyptatelus fractus* Ameghino, 1902 (véase Ameghino, 1897, Ameghino, 1902, Loomis, 1914 & Simpson, 1948) y *Clypeotherium magnum* Scillato-Yané, 1977. Por el contrario, y como era de esperar, *N. originalis* y *N. sincelejanus*, del Valle Superior del Magdalena y la costa Caribe colombiana, respectivamente, son semejantes entre sí, por lo que la comparación se hará esencialmente entre estas últimas.

Las placas del caparazón de *N. sincelejanus* son ligeramente más pequeñas y delgadas que las de *N. originalis*; en ambas especies las placas son mayormente hexagonales, aunque se encuentran algunas pentagonales; en la especie de Sincelajo las placas hexagonales parecen ser más constantes; en general, la diferencia entre las dimensiones antero-posterior y transversal es pequeña.

En las dos especies de *Neoglyptatelus* las superficies externas de las placas son lisas. Los surcos que separan las placas, así como aquellas que limitan la figura central y las periféricas son, en *N. sincelejanus*, menos profundos que en *N. originalis*, de modo que en esta última las figuras son ligeramente más convexas. En cada placa existe una figura central poligonal, ubicada en la parte posterior y 5, como máximo, y 3 como mínimo, figuras periféricas, cuyo tamaño disminuye de adelante hacia atrás (Lámina I: A, B, y C) La cantidad de figuras periféricas también disminuye desde la parte dorsal hacia las zonas laterales del caparazón, de modo que las placas de las hileras de los bordes son pequeñas y convexas (Lámina I: C)

El número de forámenes pilíferos varía entre 1 y 3 en las dos especies, aunque en *N. sincelejanus* los forámenes son más pequeños y menos notorios.

La parte anterior del tubo caudal está algo deformado y le faltan placas (Lámina I: D) Se han conservado 6 bandas móviles completas y la hilera anterior de la séptima. El diámetro del tubo caudal disminuye progresivamente de adelante hacia atrás. Cada banda está constituida por dos hileras de placas: la anterior, formada por placas mó-

viles que muestran una carilla articular bien diferenciada, y la posterior, compuesta por placas fijas. En el espécimen, la hilera móvil de la segunda banda está constituida por 18 placas, mientras que la de la séptima sólo posee 9 placas. En general, en las bandas las placas son pentagonales, aunque las de las hileras móviles (anteriores) son alargadas en sentido antero-posterior, mientras que las de las hileras posteriores son cortas; estas últimas se disponen de forma tal que encajan parcialmente entre la parte posterior de dos placas de la hilera anterior.

Medidas:

<i>N. originalis</i>	<i>N. sincelejanus</i>
Espesor de las placas	5.0 a 6.0 mm < 5.5 mm
Largo (medida antero-posterior)	>16.0 mm < 13.5 mm 13 a 20 mm (Carlini <i>et al.</i> , 1997)
Ancho (medida izquierda-derecha) ..	>15.0 mm < 13.0 mm 13 a 16 mm (Carlini <i>et al.</i> , 1997)

Comentarios: De un punto de vista paleobiogeográfico, el descubrimiento de *N. sincelejanus* en la Costa Caribe colombiana extiende hasta el extremo norte de Sudamérica la distribución de la subfamilia Glyptatelinae, que previamente estaba restringida a la parte central (Bolivia) y meridional (Argentina) de Sudamérica.

En un contexto temporal, la presencia de *Neoglyptatelus* en el Laventense de La Tatacoa y la Costa Caribe colombiana (Mioceno Medio Tardío) extiende considerablemente el biocrón de la subfamilia, que anteriormente parecía limitarse al Mustersense y el Deseadense, toda vez que la primera de estas Edades-Mamífero se ubica entre 45 y 48 Ma (Flynn & Swisher, 1995), o sea Eoceno Inferior, Pisos Luteciense-Ypresiense (International Stratigraphic Chart, IUGS, 2000), y la segunda, Deseadense, comprende el lapso 24.5 a 29 Ma (Flynn & Swisher, *Op. Cit.*), es decir Oligoceno Tardío, Piso Chattiense. De estas últimas Edades se registraron *Glyptatelus*, *Clypeotherium* y una forma no descrita de Salla, Bolivia (Ameghino, 1897 y 1902, Simpson, 1948, Scillato-Yané, 1977 y Marshall *et al.*, 1983).

La presencia tardía y aislada de *Neoglyptatelus* en relación con las formas argentinas sugiere que una sepa troncal de Glyptatelinos se desarrolló en la parte meridional de Sudamérica; de ella debieron separarse dos ramas filéticas independientes, una de las cuales se mantuvo en el mis-

mo territorio y terminó extinguiéndose muy rápidamente (Deseadense), mientras que la segunda pudo migrar, muy temprano, hacia el norte, donde, sin ser un grupo exitoso (pues sus restos no son especialmente abundantes), pudo subsistir hasta el Mioceno Medio Tardío, es decir hasta poco antes de la ocurrencia de la fase miocénica de la Orogenia Andina, que parece haber influido de manera substancial en el desarrollo de la fauna de mamíferos.

Orden RODENTIA Bowdich, 1821
Familia Dinomyidae ALSTON, 1876

?*Gyriabrus royo* Stirton, 1947

Holotipo: Un premolar superior derecho (P4), poco gastado, y un incisivo superior (Stirton, 1953) No se menciona el repositorio, pero probablemente hace parte de las colecciones del Museo Paleontológico “José Royo y Gómez” del INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.

Descripción: La descripción que hace Stirton (1947) del holotipo es completa y detallada y no requiere adiciones complementarias.

Nota aclaratoria: Con el fin de evitar confusiones futuras, debe aclararse que la especie ?*Gyriabrus royo* fue propuesta por Stirton en 1947 y nó en 1946, como equivocadamente indica el mismo Stirton (1953: 618) El error parece deberse a que este autor, al final de su artículo, anota “Berkeley, Cal., January 1946”. En realidad, la fecha válida es aquella de la publicación efectiva del Tomo VII de la “Compilación de Estudios Geológicos Oficiales en Colombia”, que es 1947. En Porta (1961:97) y Mones (1986:208) se encuentra ya esta corrección, pero nó en Hoffstetter (1971: 42) y Marshall *et al.* (1983: 51)

Ubicación geográfica, estratigráfica y edad: En 1947, Stirton indica que el tipo de ?*Gyriabrus royo* fue encontrado por José Royo y Gómez, en el km 35 de la carretera Toluviejo-Sincelejo, hoy Departamento de Sucre. Años después el mismo Stirton (1953:618) publica un mapa con la ubicación de lo que denomina “Peñata Fauna”. Por su parte Hoffstetter (1971:42) indica que el premolar y el incisivo fueron encontrados en la Sierra de Peñata, próxima a La Peñata, población que según el “Atlas de Colombia” (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2002) se ubica a 5 ó 6 kilómetros al NNE de Sincelejo, y figura bajo la denominación de Brisas del Mar.

Según Stirton (1953: 618), las piezas de ?*G. royo* fueron encontradas en las areniscas de grano fino, de color gris verdoso claro de la “San Antonio Sandstone” de Beck (1921) Esta unidad, como se observa en el Cuadro de Correlaciones de la Fig. 3, sería parcialmente equivalente

de la "Savana Sandstone" de **Werenfels** (1926) y la Formación Cerrito de **Caro** (2003: Fig. 3.2).

Stirton (1947 y 1953) considera que *?G. royo* puede atribuirse probablemente al Mioceno Superior, con posibilidad de referirla al Plioceno Inferior. Por su parte, **Porta** (1961:97), luego de desarrollar trabajos de campo en la región de descubrimiento del tipo, considera que la unidad litoestratigráfica portadora del fósil -en la que, según este autor, son frecuentes los restos de troncos silificados- corresponde a la "Savana Sandstone" de **Werenfels**, que puede atribuirse al Mioceno Superior. Años después, **Porta** (1969:82) reafirma la edad sobre la base de que el fósil fue encontrado en gravas que yacen discordantemente sobre depósitos marinos del Mioceno Medio o Superior. El descubrimiento de *Neoglyptatelus sincelejanus* unos pocos kilómetros al sur del sitio de hallazgo de *?G. royo*, en sedimentitas plegadas que podrían ser la prolongación de las portadoras de *?G. royo* (véanse las planchas geológicas 44: Sincelejo y 52, **Clavijo et al.**, 1998), apoyan la posibilidad de una edad Miocena Media Tardía a Miocena Superior para *?G. royo*.

Orden NOTOUNGULATA Roth, 1903
Suborden TOXODONTIA Owen, 1853
Familia Toxodontidae Owen, 1845
Subfamilia Toxodontinae Trouessart, 1898
Género *Mixotoxodon* Van Frank, 1957
Especie *Mixotoxodon larensis* Van Frank, 1957

Material estudiado: ICN – 0135: Rama horizontal mandibular derecha con la parte basal de la sínfisis; se han preservado parte de los alvéolos de los i3 (izquierdo y derecho), p3 y m3 (derechos); los molariformes p4, m1 y m2 están fracturados a nivel del borde alveolar (Lámina II: A, B, y C)

Nota aclaratoria: Sobre la base de este material **Porta** (1959) propone la subespecie *Mixotoxodon larensis crusafonti*, sin embargo, las características y calidad del material hacen que los argumentos para la proposición de la nueva subespecie sean frágiles e insuficientes, por lo que parece conveniente el estudio de material adicional, que permita su adecuada caracterización, antes de su aceptación..

Repositorio: La pieza hace parte de las colecciones paleontológicas del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Ubicación geográfica y estratigráfica: El espécimen fue descubierto por el antropólogo **Reichel – Dolmatoff**, en Chivolo, cabecera municipal ubicada en el centro-occidente del departamento del Magdalena (Figura 1) Según referencia del descubridor (*in Porta*, 1959:55), la

pieza fue encontrada, junto con otros restos óseos, a 5 metros de profundidad, cuando se excavaba un pozo para extraer agua. El nivel portador está constituido por arenas, cuya pertenencia a alguna unidad litoestratigráfica se desconoce, pero que por sus características litológicas y por la edad del fósil podría corresponder a la Formación Rotinet, o al menos correlacionarse con ella.

Edad: La especie *Mixotoxodon larensis* fue inicialmente descrita por **Van Frank** (1957) sobre material colectado en San Miguel, Lara, aproximadamente 35 Km al SW de Barquisimeto, Venezuela, es decir en una región no muy distante de Chivolo. Si se tiene en cuenta este aspecto, la semejanza morfoanatomica y el estado evolutivo de las formas venezolana y colombiana, puede admitirse, siguiendo a **Van Frank** (Op. Cit.) y **Porta** (1959:56), una edad pleistocénica para el fósil; mas aún, cabe la posibilidad de restringir esta edad al Pleistoceno Tardío, ya que, como indica **Porta** (*in Hoffstetter*, 1971:52), refiriéndose a los mamíferos pleistocénicos colombianos, "...la mayoría, si no la totalidad de las recolecciones corresponden al Pleistoceno superior o aun al Pleistoceno terminal.", que en la Escala de Edades-Mamífero de Sudamérica corresponde al denominado Lujanense.

Familia Toxodontidae Gervais, 1847
Gen. et Sp. Indet.

Material estudiado: RB–Los Palmitos: Mitad distal de húmero izquierdo bien preservado. La pieza ha sufrido transporte, lo que ha ocasionado que sus crestas y bordes estén algo desgastados y que el extremo de la apófisis epicondilar y la mayor parte de la tróclea se hayan perdido. Algunas partes de la pieza se encuentran recubiertas por una delgada capa de arenisca de grano grueso (Lámina II: D y E)

El espécimen hace parte de las colecciones paleontológicas del Museo "José Royo y Gómez" del INGEOMINAS, Bogotá.

Lugar de procedencia, nivel estratigráfico y edad: Según referencia de **R. Barrera**, geólogo de INGEOMINAS, Cartagena, el espécimen fue encontrado en la Finca Villa Angélica (La Bomba), 2 Km al norte de la cabecera municipal de Los Palmitos (Fig. 1), a su vez ubicada 7.5 Km al NNE de Corozal (Departamento de Sucre), dentro de una secuencia de areniscas correspondientes al Miembro Morrocoyal de la Formación Sincelejo, (véase Fig. 3) El sedimento que cubre parcialmente la pieza consiste de arenisca de grano grueso y arenisca conglomerática, en la que algunos clastos alcanzan hasta 6 mm de diámetro; en su mayoría los granos son de cuarzo cristalino, en menor cantidad se encuentran chert negro y rocas



Lámina II: *Mixotoxodon larensis* Van Frank, 1957. Rama horizontal mandibular derecha con la base de la sínfisis. A: Vista lingual, B: Vista labial y C: Vista oclusal (Escala en centímetros). Toxodóntidae indet. de Los Palmitos. Mitad distal de húmero izquierdo. D: Vista anterior y E: Vista posterior (Escala en centímetros).

volcánicas (?); los granos son subangulares y subredondeados. El color de la roca es pardo amarillento claro a ligeramente verdoso.

Hasta donde es posible establecer, el toxodóntido de Los Palmitos representa una forma que morfológicamente puede considerarse intermediaria entre *T. burmeister*, del Pleistoceno, y *N. imbricatus* o *A. ovinum*, del Santacrucense (Mioceno Inferior-Medio, 16.0-17.5 Ma, según **Flynn & Swisher**, 1995: 325), ya que el espécimen es mucho más pequeño, más grácil y presenta rasgos morfoanatomicos menos especializados que los de *T. burmeister*, mientras que es más grande, más robusto y de rasgos apomorfos en relación con *N. imbricatus* y *A. ovinum*. Este hecho, desde un punto de vista cronológico, permitiría inferir que el toxodóntido de Los Palmitos hubiera pertenecido a una forma intermedia que vivió entre el Pleistoceno y el Mioceno Medio, posiblemente en el Plioceno. El reporte de **Porta** (1961: 97) sobre el descubrimiento en la Formación Sincelejo, en la región de Sincelejo – Corozal, de varias piezas de un toxodóntido “..... tres voisins du genre *Trigonodops*” (**Porta**, 1969:38) coincide con esta deducción, ya que *Trigonodops* (no *Trigonodops*), género propuesto por **Kraglievich** en 1931 (véase **Marshall et al.**, 1983), posee las características de las formas pliocénicas. Años después **Porta** (1974:175) precisa que el Toxodóntido de Sincelejo – Corozal está representado por un fragmento mandibular (no ilustrado ni estudiado en detalle y cuyo repositorio actual se desconoce) que puede atribuirse a *Trigonodops* (*Sic*); también indica que el espécimen fue recolectado en areniscas (sobre las que estaría construida la ciudad de Corozal) que estratigráficamente harían parte de la base de la Formación Corozal, unidad litoestratigráfica que, como puede verse en el Cuadro 1, sería equivalente de la parte superior de la “Sincelejo Sandstone” de **Werenfels** (1926) Finalmente, es interesante anotar que el fragmento mandibular de *Trigonodops* y la extremidad distal del húmero del toxodóntido de Los Palmitos fueron recolectados en la misma región, mediando entre ambos hallazgos unos 2 Km aproximadamente.

Descripción y comparación: La parte superior de la cara anterior del espécimen está fracturada, a pesar de lo cual puede deducirse que la sección transversal de la diáfisis era aproximadamente oval. La epífisis distal, como en los ungulados en general, es muy ancha, debido a la proyección externa del epicóndilo, que en el ejemplar está parcialmente fracturado. La forma general de la epífisis semeja más a la de *Toxodon burmeister* (véase **Scott**, 1912:153) que a la de *Nesodon imbricatus* y *Adinotherium ovinum*. La tróclea es amplia y poco profunda, el cóndilo se ha conservado parcialmente. En vista

anterior (Lámina II: D) puede observarse que la foseta epitroclear es somera, mientras que en vista posterior (Lámina II: E) se ve que la fosa olecraneana es ovoidea y que está profundamente excavada, en su fondo, ocupando una posición central, se abre un gran foramen supratroclear, también de forma oval, este foramen también se presenta en *Nesodon imbricatus* y *Adinotherium ovinum*, aunque en posición algo más externa.

Ancho diáfisis (aprox.) 6.6 cm

Ancho máximo epífisis distal (aprox.) 17.0 cm

Familia Gomphotheriidae CABRERA, 1929

Género *Haplomastodon* Hoffstetter, 1950

Especie *Haplomastodon waringi* (Holland, 1920)

Material: Fragmento de maxilar izquierdo con la raíz del arco zigomático correspondiente; en él se han conservado la base de la corona de M2 y M3 con los conos externos rotos. El espécimen debió ser transportado antes de su ubicación final, pues sus bordes muestran desgaste (Lámina III: A y B)

Comentarios: En años recientes algunos autores han reconsiderado ciertos aspectos relacionados con los mastodontes sudamericanos, como son su taxonomía y el tiempo de su llegada al Continente. El segundo tema, muy importantes en otro contexto, no será tratado aquí, en cambio, en cuanto a la taxonomía del grupo se hace necesario por lo menos mencionar los cambios que se han propuesto en años recientes, ya que a la conclusión de **Simpson & Paula Couto** (1957), en sentido de que el mastodonte que pobló la parte norte de Sudamérica (específicamente Ecuador, Colombia, Venezuela y la región templada del sudoeste de Brasil) fue *Haplomastodon waringi*, **Ficcarelli et al.** (1995) establecen que la especie que pobló esa región fue *Haplomastodon chimborazi*, mientras que para **Alberdi & Prado** (1995) esa especie fue esencialmente *Stegomastodon waringi*. En el país el registro fósil de los mastodontes es abundante pero muy fragmentario, y, a la fecha, no existen estudios detallados, por lo que, mientras se adelanten trabajos específicos, aceptaremos, de forma provisional y siguiendo la corriente tradicional, que la especie que pobló el territorio colombiano durante el Pleistoceno fue *Haplomastodon waringi*.

Por otra parte, el registro fósil que se tiene de los mastodontes sudamericanos indica que su biocrón comprende todo el Pleistoceno (véase por ejemplo **Marshall et al.**, 1984:20, **Alberdi & Prado**, 1995:292), toda vez que los primeros representantes Gomphotériidos cruzaron el estrecho de Panamá a finales del Plioceno o inicios del Pleistoceno (Edad-Mamífero Uquiense) produciéndose

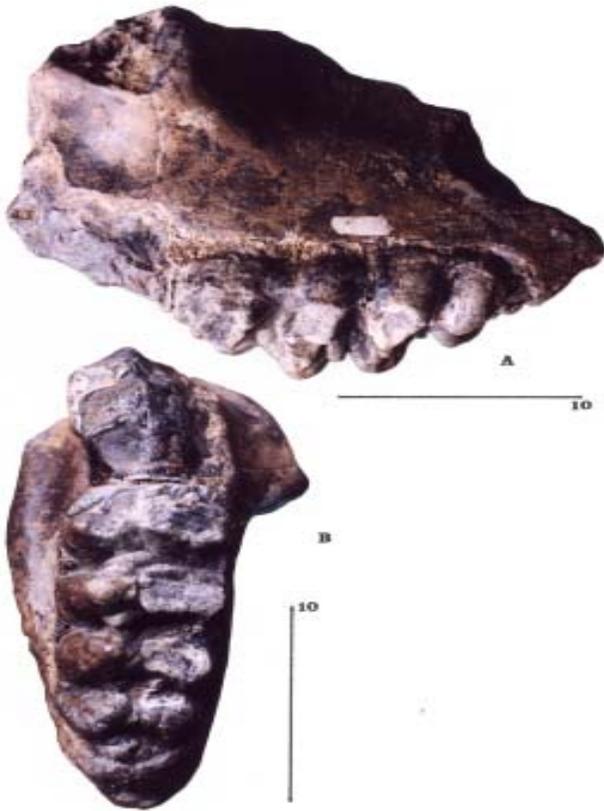


Lámina III: *Haplomastodon waringi* (Holland, 1920). Fragmento de maxilar izquierdo con la base del arco zigomático; se ha conservado la base de la corona de M2 y M3 con los conos externos rotos. A: Vista desde el lado izquierdo y un poco de abajo, B: Vista palatal (Escala en centímetros).

su extinción a finales del Pleistoceno (Lujanense) Al respecto, en un reciente reporte **Campbell et al.** (2000) reconsideran la fecha de migración de los mastodontes a Sudamérica, ya que sobre la base del descubrimiento de un nuevo Gomphotheriido (*Amahuacatherium peruvium*) en la Amazonía peruana sostienen que la llegada pudo producirse en el Mioceno Tardío (aproximadamente 9.5 Ma, o más). El que el descubrimiento de *Amahuacatherium* tenga o no la antigüedad que indican sus autores escapa a los objetivos del presente trabajo. En cambio, es importante recordar la observación de **Porta (in Hoffstetter, 1971:52)** en sentido de que los yacimientos colombianos de mamíferos pleistocénicos pueden atribuirse al Pleistoceno Tardío (correspondiente a la Edad Mamífero Lujanense, según **Flynn & Swischer, 1995**), edad a la que creemos se pueden referir las “Gravas de Rotinet”.

Procedencia geográfica, ubicación estratigráfica y edad: Según referencia de **Caro et al.** (1985), el mas-

todonte que se estudia fue encontrado en la Cantera Barrera, al norte de Rotinet (Fig. 1) Los mismos autores también señalan la existencia de restos de mastodontes “En los sectores de Rotinet y Juan de Acosta hacia.....” (p. 389)

Las “Gravas de Rotinet”, según **Caro et al.** (*Op. Cit.*), están constituidas por una alternancia de gravas y arenas con esporádicos cuerpos lenticulares de lodolitas (Fig. 2). La unidad aflora en las cercanías del Canal del Dique, de las Ciénagas de Guájaro y Totumo y Juan de Acosta, a lo largo de antiguos brazos del río Magdalena. Como se discute más arriba, la presencia de restos de *Haplomastodon waringi* en las “Gravas de Rotinet” indican que su edad es posiblemente Pleistocena Tardía, en todo caso Pleistocena, que es el biocrón de la familia Gomphotheriidae en Sudamérica.

Conclusiones y consideraciones finales: De manera general, las conclusiones se relacionan con aspectos paleontológicos, por una parte, y tectono-estratigráficos, por otra.

De un punto de vista paleontológico, la importancia de la presencia de mamíferos fósiles en sedimentitas neogénicas continentales de la Costa Caribe Colombiana radica en que la región fue una zona de paso obligado para los emigrantes norte y sudamericanos del denominado “Gran Intercambio Faunístico”, que se inició a finales del Plioceno y prosiguió durante el Pleistoceno. En este contexto, debe admitirse que todo nuevo hallazgo proporciona información valiosa para dilucidar la secuencia temporal de migración y la naturaleza de la composición de los grupos taxonómicos que atravesaron el Estrecho de Panamá, en ambos sentidos. Al respecto, debemos recordar que el



Figura 2. Afloramiento de las «Gravas de Rotinet» en la Ciénaga de Guájaro, donde se colectó el Fragmento de maxilar de *Haplomastodon waringi* (Foto cedida por P. Caro)

	Beck (1921)	Werenfels (1926)	Cáceres & Porta (1974)	Guzmán (1995)	Reyes & Clavijo (1996)	Clavijo et al. (1998)	Caro (2003)	Este Trabajo	Fósiles
HOLOCENO				F. Betulia/F. Ocal	?	?			5
PLEISTOCENO				F. Sincel./Rotinet	F. Rotinet	Fm. Betulia	Sincelejo o Betulia	Fm. Rotinet	4
PLIOCENO	San Antonio Sandstone Formation	Sincelejo Sandstone	F. Corozal Fm. El Piñal Fm. Morroa	Fm. Cerrito/ Fm. Zambrano	F. Sincelaje ?	Fm. Sincelaje		Fm. Sincelaje?	2
MIOCENO	Huertas Limestone Serie	Sabana Sandstone Cerrito Formation	Formación El Descanso Formación El Cerrito	Fm. Cerrito/ Fm. Zambrano Fm. Carmen	F. Cerrito, F. Rancho, F. Zambrano, etc. F. Maco, F. Pendales, etc.	Fm. Cerrito/ Fm. Rancho, Fm. Carmen	Cerrito Carmen/ Cien. de Oro	?	1 3

Figura 3. Cuadro de Correlaciones que sintetiza los esquemas estratigráficos utilizados por diferentes autores. A la derecha se ubican los fósiles de mamíferos descubiertos en la Costa Caribe Colombiana: 1: *Neoglyptatelus sincelejanus*, 2: *Trigodonops* y *Toxodontidae* indet. de Los Palmitos, 3: *?Gyriabrus royo*, 4: *Mixotoxon larensis* y 5: *Haplomastodon waringi*

registro actual de mamíferos fósiles en la región es insuficiente y deficiente, por lo que, en el futuro, será necesario no sólo incrementar la cantidad de descubrimientos sino también ampliar y precisar la información geográfica y estratigráfica de cada nuevo descubrimiento.

En este contexto, es posible que, al menos en buena parte, las diferencias entre arreglos estratigráficos de las sedimentitas continentales neogénicas de la Costa Caribe se deban a la insuficiencia de dataciones precisas, ya que la disponibilidad de una mayor cantidad de datos cronoestratigráficos (de los que hoy se tienen) permitiría un arreglo coherente de las unidades litoestratigráficas, hecho que, a su vez, posibilitaría el ordenamiento de las diferentes fases de la Orogenia Andina que afectaron la región, posibilitando así la proposición de modelos tectono-estratigráficos regionales verosímiles, tarea en la que, además, será necesario involucrar las interacciones que se dan entre las placas de Nazca, Caribe, Cocos y Sudamericana.

Sobre lo anterior, cabe resaltar que a pesar de la pobreza y el carácter puntual de los hallazgos de mamíferos fósiles en la Costa Caribe, el estudio de los especímenes hace posible extraer importantes conclusiones estratigráficas y tectónicas, como las que se indican a continuación. El descubrimiento de *Neoglyptatelus sincelejanus* y *?Gyriabrus royo* señala la existencia de sedimentitas de edad Miocena Media Tardía a Miocena Superior Temprana en los alrededores de Sincelejo; ambos fósiles fueron descubiertos en la

franja de rocas plegadas que se extiende al NNE y SSE de Sincelejo y que, en las Planchas Geológicas 52 y 44 de INGEOMINAS, se refieren –al parecer equivocadamente– a la Formación Sincelejo, de edad Pliocena Tardía. A su vez, el hallazgo de toxodóntidos (el de Los Palmitos y el de cf. *Trigodonops*) al norte de Corozal indica la presencia de sedimentitas pliocénicas, que en las planchas geológicas antes mencionadas están mapeadas como pertenecientes (esta vez quizá correctamente) a la Formación Sincelejo; estos hallazgos se dieron en una franja de rocas suavemente inclinadas (10° a 20°), ubicadas al SE de la franja anterior; de esta forma, pensamos que entre ambas franjas (la de rocas plegadas, que incluye los anticlinales y sinclinales próximos a Sincelejo, y aquella de sedimentitas suavemente inclinadas, expuestas en las vecindades de Corozal y Morroa) puede marcarse una discordancia angular de edad Miocena Tardía/Pliocena Temprana, la misma que, obviamente, separaría dos unidades litoestratigráficas diferentes de rango “Formación”. El hecho de que los restos de *Neoglyptatelus sincelejanus* estén muy deformados tectónicamente y no así el espécimen del Toxodóntido de Los Palmitos apoyaría, así fuera indirectamente, la anterior conclusión. Al respecto, **Caro** (2003) marca, en el límite entre el Mioceno Inferior y Medio, una discordancia (Uplift Early Andean Orogeny) entre las Formaciones Carmen/Cienaga de Oro y la Formación Cerrito. Esta discordancia podría corresponder a la que, en el presente trabajo, se marca a finales del Mioceno y/o comienzos del Plioceno (véase Fig. 3).

Una conclusión similar a la anterior puede extraerse de la superposición de las sedimentitas pleistocénicas sobre las pliocénicas, toda vez que aquellas que conforman la Formación Rotinet, de edad Pleistoceno Tardío, por ser portadoras de *Haplomastodon waringi* y *Mixotoxodon larensis*, están dispuestas horizontalmente, mientras que las pliocénicas (Formación Sincelejo?), portadoras de restos de Toxodóntidos (el de Los Palmitos y cf. *Trigodonops*), están –como se dijo más arriba– suavemente basculadas. Es decir, es posible marcar la existencia de otra discordancia angular entre las sedimentitas pliocénicas y pleistocénicas, la que indicaría la ocurrencia en la región, a finales del Plioceno y/o comienzos del Pleistoceno, de la última fase de la Orogenia Andina. Este evento podría corresponder a aquel que **Caro** (2003) marca entre el Plioceno Inferior y Medio, y que, en el esquema estratigráfico que usa separa las Formaciones Cerrito y Sincelejo o Betulia.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Dra. María Páramo, Directora del Museo Paleontológico “José Royo y Gómez” y al Geólogo Rodolfo Barrera, ambos funcionarios de INGEOMINAS, por habernos facilitado el material de *N. sincelejanus* y la pieza del toxodóntido de Los Palmitos, respectivamente. El Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, dio, al primer autor, facilidades para adelantar este trabajo.

Bibliografía

- Alberdi, M. T. & Prado, J. L.** 1995. Los mastodontes de América del Sur. In **Alberdi, M. T., Leone, G. & Tonni, E. P.** (Edits.). Evolución biológica y climática de la región Pampeana durante los últimos cinco millones de años. Un ensayo de correlación con el Mediterráneo Occidental. Monografías. Museo Nacional de Ciencias Naturales-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Pp. 279-292.
- Ameghino, F.** 1897. Les mammifères crétacés de l'Argentine. Deuxième contribution à la connaissance de la faune mammalogique des couches à *Pyrotherium*. Bol. Inst. Geogr. Argentina. Vol. 18, pp.1-117.
- _____. 1902. Notice préliminaire sur des mammifères nouveaux des terrains crétacés de Patagonie. Bol. Acad. Nac. Cienc. Córdoba, Buenos Aires, Vol. 17, pp. 5-70
- Caro, M.** 2003. Structural evolution of the San Jacinto fold Belt, NW Colombia. University of Calgary, Faculty of Graduate Studies, Department of Geology and Geophysics, Master Thesis, Inedit.
- Clavijo, J., Barrera, R., Guzmán, G., Kassem, T., Cáceres, C., Cucalón, I. & Duque-Caro, H.** 1998. Geología de la Plancha 44: Sincelejo. INGEOMINAS.
- _____. **Cucalón, I., Kassem, T., Cáceres, C. & Duque-Caro, H.** 1998. Geología de la Plancha 52. INGEOMINAS.
- Campbell jr., K. E., Frailey, C. D. & Romero Pittman, L.** 2000. The Late Miocene Gomphothere *Amahuacatherium peruvium* (Proboscidea: Gomphotheriidae) from Amazonian Perú: Implications for The Great American Faunal Interchange. Inst. Geol. Miner. Y Metalúrg., Bol. 23, Ser. D: Estudios Regionales, pp. 1-152.
- Carlini, A. A., Vizcaíno, S. F. & Scillato-Yané, G. J.** 1997. Armored Xenarthrans: a unique taxonomic and ecologic assemblage. In **Kay, R. F., Madden, R. H., Cifelli, R. L. & Flynn, J. J.** (Edits.). Vertebrate Paleontology in the Neotropics. The Miocene Fauna of La Venta, Colombia. Smithsonian Institution Press. Pp. 213-226.
- Caro, M.** 2003. Structural evolution of the San Jacinto fold belt, NW Colombia. Master of Science Thesis, Department of Geology and Geophysics, University of Calgary, Alberta, Canadá. Pp. 1-72
- Caro, P., Plazaz, L., Vázquez, L., Huguet, A., Angel, C., Esquivel, S. & Sarmiento, G.** 1985. Geología para aguas subterráneas en los departamentos de Atlántico – Bolívar (Colombia). Mem. VI Congr. Latinoamer. Geol., T. III, pp. 378-394.
- Ficcarelli, G., Borselli, V., Herrera, G., Moreno Espinosa, M. & Torre, D.** 1995. Taxonomic remarks on the South American mastodons referred to *Haplomastodon* and *Cuvieronius*. GEOBIOS, Vol. 28, No. 6, 745-756.
- Flynn, J. J. & Swisher III, C. C.** 1995. Cenozoic South American Land Mammal Ages: Correlation to Global Geochronologies. In **Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M.-P. & Hardenbol, J.** (Edits.). Geochronology, Time Scales and Stratigraphic Correlation. SEPM, Spec. Public. 54, pp. 317-333.
- Guzmán, G.** 1995. Geología regional del Caribe colombiano. Problemática estratigráfica. VI Congr. Colombiano del Petrol. y Medio Ambiente: Desarrollo Social. Memorias, T. I, pp. 57-63.
- Hoffstetter, R.** 1971. Los vertebrados cenozoicos de Colombia: yacimientos, faunas, problemas planteados. Geol. Colombiana, No. 8, pp. 37-62.
- Loomis, F. B.** 1914. The Deseado Formation of Patagonia. Eighth Amherst Expedition, 1911. Amherst College, Massachussets. Pp. 1-232.
- Marshall, L. G., Hoffstetter, R. & Pascual, R.** 1983. Mammals and stratigraphy: geochronology of the continental mammal – bearing Tertiary of South America. Palaeovertebrata, Mém. Extr. Pp. 1-93.
- _____. **Berta, A., Hoffstetter, R., Pascual, R., Reig, O. A., Bombin, M. & Mones, A.** 1984. Mammals and Stratigraphy: Geochronology of the continental mammal-bearing Quaternary of South America. Palaeovertebrata, Mém. Extr. Pp. 1-76.
- Porta, J. de.** 1961. Algunos problemas estratigráfico-faunísticos de los Vertebrados en Colombia (con una bibliografía comentada) Bol. Geol., No. 7, pp. 783-104.
- _____. 1969. Les vertébrés fossiles de Colombie et les problèmes posés par l'isolement du continent Sud-Américain. Palaeovertebrata, Vol. 2, Fasc. 2, pp. 77-94.

- _____. 1974. Lexique Stratigraphique International, Amérique Latine, Colombie. 2^{ème} partie, *Tertiaire et Quaternaire*. Vol. 5, Fasc. 4b, pp. 1- 692.
- _____. 2003. La formación del Istmo de Panamá. Su incidencia en Colombia. *Revist. Acad. Colombiana Cienc. Exact., Físic. y Nat.* Vol. 27, No. 103, pp.192-216, Bogotá.
- Reyes, G. & Clavijo, J.** 1996. Geología de los Cinturones de San Jacinto y Sinú Norte. VII Congr. Colombiano Geol., INGEOMINAS, Bogotá. T. III, pp. 27-37.
- Scott, W. B.** 1912. Mammalia of the Santa Cruz Beds. Vol. 6, Paleontology. Pt. 2, Toxodonta. Reports of the Princeton University Expeditions to Patagonia, 1896-1899. Stuttgart: Princeton University, E. Schweizerbart'sche Verlagshandlung (E. Nàgele). Pp. 111-238.
- Scillato-Yané, G. J.** 1977. Sur quelques Glyptodontidæ nouveaux (Mammalia, Edentata) du Déséadien (Oligocène Inferieur) de Patagonie (Argentine). *Bull. Mus. Nat. D'Hist. Natur.*, 3^{ème} Sér., No. 487, pp. 249-258.
- Simpson, G. G.** 1948. The beginning of the age mammals in South America. Part 1. Introduction. Systematics: Marsupialia, Edentata, Condylarthra, Litopterna, and Notioprogonia. *Bull. Amer. Mus. Nat. Hist.*, Vol. 91, pp 1-232.
- _____. & **Paula Couto, C. de.** 1957. The mastodons of Brazil. *Bull Amer. Mus. Nat. Hist.*, Vol. 112: Art. 2, pp. 125-190.
- Stirton, R. A.** 1947. A Rodent and a Peccary from the Cenozoic of Colombia. *Comp. Est. Geol. Ofic. En Colombia. T. VII*, 317-324.
- _____. 1953. Vertebrate paleontology and continental stratigraphy in Colombia. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, Vol. 64, pp. 603-622.
- Van Frank, R.** 1959. A fossil collection from Venezuela. 1. Toxodontidae (mammalia, Notoungulata). *Amer. Mus. Novit.* No. 1850, pp. 1-38.
- Werenfels, A.** 1926. A stratigraphical section through the Tertiary of Toluviejo, Columbia. *Eclog. Geol. Helv.*, T. 20, pp. 79-83.

Recibido el 7 de diciembre de 2004

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2005

ESQUEMAS ESPACIALES DE ZONACIÓN ECOLÓGICA Y MORFOLOGÍA DE LAS LAGUNAS DE LOS ATOLONES Y COMPLEJOS ARRECIFALES DE UN ARCHIPIÉLAGO OCEÁNICO DEL CARIBE: SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA (COLOMBIA)

por

Juan Manuel Díaz M.¹

Resumen

Díaz M., J.M.: Esquemas espaciales de zonación ecológica y morfología de las lagunas de los atolones y complejos arrecifales de un archipiélago oceánico del Caribe: San Andrés y Providencia (Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **29** (112): 357-369. 2005. ISSN 0370-3908.

Los atolones y complejos arrecifales oceánicos del Archipiélago de San Andrés y Providencia, en el Caribe sudoccidental, poseen cuencas lagunares semi-cerradas a semi-abiertas en las que se desarrollan diferentes hábitats bentónicos característicos. Ciertas zonas del fondo lagunar están cubiertas por sedimentos, a veces vegetados por algas y pastos marinos, y en otras por estructuras coralinas de varios tipos según la composición y dominancia de distintas especies de corales y la morfología y grado de desarrollo del andamiaje arrecifal. Este trabajo pretende determinar los esquemas de distribución espacial de los hábitats bentónicos de las lagunas a partir del análisis de los gradientes de los factores físicos más relevantes. Se establecieron tendencias en la presencia y abundancia de la mayoría de los hábitats en relación con el nivel de energía del oleaje, la profundidad y la presencia de islas. Ciertos tipos morfológicos de arrecifes están orientados en dirección preferencial y presentan un esquema de desarrollo espacial aparentemente en respuesta a la intensidad y dirección predominante de las corrientes y del oleaje.

Palabras clave: Lagunas arrecifales, arrecifes coralinos, zonación ecológica, geomorfología, San Andrés y Providencia, mar Caribe, Colombia.

¹ Instituto de Investigación en Recursos Biológicos "Alexander von Humboldt", Cra. 7 No. 35-20, Bogotá, D.C., Colombia. Correo electrónico: jmdiaz@humboldt.org.co

Abstract

The oceanic atolls and reef-complexes of the Archipelago of San Andrés and Providencia exhibit semi-enclosed to rather open lagoon basins, where various characteristic bottom habitats occur. Certain areas of the lagoon floor are covered by sediments, being in some settings vegetated by algae or seagrass, and other areas by coralline framework of different types according to the composition and dominance of coral species and to their morphology and level of reef development. This study seeks to determine the spatial distribution patterns of lagoon bottom habitats based on the analysis of gradients of most relevant physical factors. Patterns in the occurrence and abundance of most habitats became evident in relation with wave-energy level, water depth, and the occurrence of islands. Some morphological reef types are oriented in a preferential direction and show spatial arrangements of development that are presumably related to prevailing current speed and direction and wave exposure.

Key words: Reef lagoons, coral reefs, ecological zonation, geomorphology, San Andrés and Providencia, Caribbean Sea, Colombia.

Introducción

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina está localizado en el sector meridional del Alto de Nicaragua (Nicaragua Rise), en el Caribe occidental, y comprende dos islas oceánicas (San Andrés y Providencia, ésta incluyendo su vecina Santa Catalina) y una serie de atolones (Albuquerque, Courtown, Roncador, Quitasueño y Serrana) y bancos coralinos (Serranilla, Bajo Alicia, Bajo Nuevo) que se disponen alineados en dirección SSW-NNE (Fig. 1). El archipiélago ha sido recientemente declarado Reserva de la Biosfera (Seaflower Biosphere Reserve) por la UNESCO.

El contexto geológico-tectónico regional y otras evidencias sugieren que los atolones, islas y bancos coralinos del archipiélago tuvieron un origen común como volcanes en el Cenozoico temprano (cf. Milliman & Supko, 1968; Geister, 1975, 1993; Geister & Díaz, 1997 y en prensa). La subsidencia de los basamentos volcánicos y la acumulación simultánea de roca caliza arrecifal sobre las cimas poco profundas de los volcanes, desde el Cenozoico hasta el Cuaternario, condujeron a la formación de los bancos someros y atolones, siguiendo a grandes rasgos el modelo propuesto por Darwin (1951) en su teoría de la subsidencia para explicar el origen de los atolones.

A pesar de las obvias diferencias morfológicas que existen entre los complejos arrecifales que rodean las dos islas mayores, por un lado, y los atolones, por el otro, las estructuras sumergidas de todos ellos han sido moldeadas por los mismos procesos, lo que se refleja en una serie de rasgos geomorfológicos y ecológicos comunes (Fig.2) (ver también Geister, 1983; Díaz *et al.*, 1996, 2000; Geister & Díaz, en prensa): (a) Un arrecife periférico o de barrera

muy bien desarrollado en el costado de barlovento, (b) una amplia terraza pre-arrecifal ligeramente inclinada que se extiende mar afuera hasta unos 20 m de profundidad, seguida por un (c) talud escarpado que se precipita hacia profundidades abisales y cuya pendiente se ve interrumpida brevemente a 35-40 m de profundidad por un escalón o terraza; a sotavento del arrecife periférico o de barrera se extiende (d) la terraza lagunar, una amplia llanura sedimentaria muy somera, cuyo límite con la cuenca de la laguna es un pronunciado cantil de arena, que progresa hacia la cuenca a medida que se van acumulando escombros coralinos y arenas provenientes de la parte frontal del arrecife; (e) la cuenca lagunar es una depresión topográfica con profundidades hasta de 20 m, pero los arrecifes de parche que se desarrollan allí suelen levantarse varios metros, incluso hasta la superficie del agua. En el costado occidental, exceptuando una leve elevación topográfica, pocas veces se presentan arrecifes de rompiente a manera de (f) segmentos del arrecife periférico de sotavento, de manera que las lagunas son generalmente abiertas hacia el oeste. La (g) terraza pre-arrecifal y el (h) talud de sotavento muestran los mismos rasgos topográficos que la de barlovento, pero suelen tener mayor cobertura de sedimentos debido a que el transporte predominante es en sentido E-W y los sedimentos evacuados desde la laguna se depositan en este sector transitoriamente. Los principales moldeadores de la morfología actual de estas estructuras han sido las oscilaciones del nivel del mar en el Pleistoceno y los regímenes dominantes de acreción arrecifal en el Holoceno. Las primeras han quedado registradas en terrazas, escalones y muescas intermareales subaéreas y sumergidas que se observan generalizadamente en el archipiélago (cf. Geister, 1983; Geister & Díaz, 1997 y en prensa).

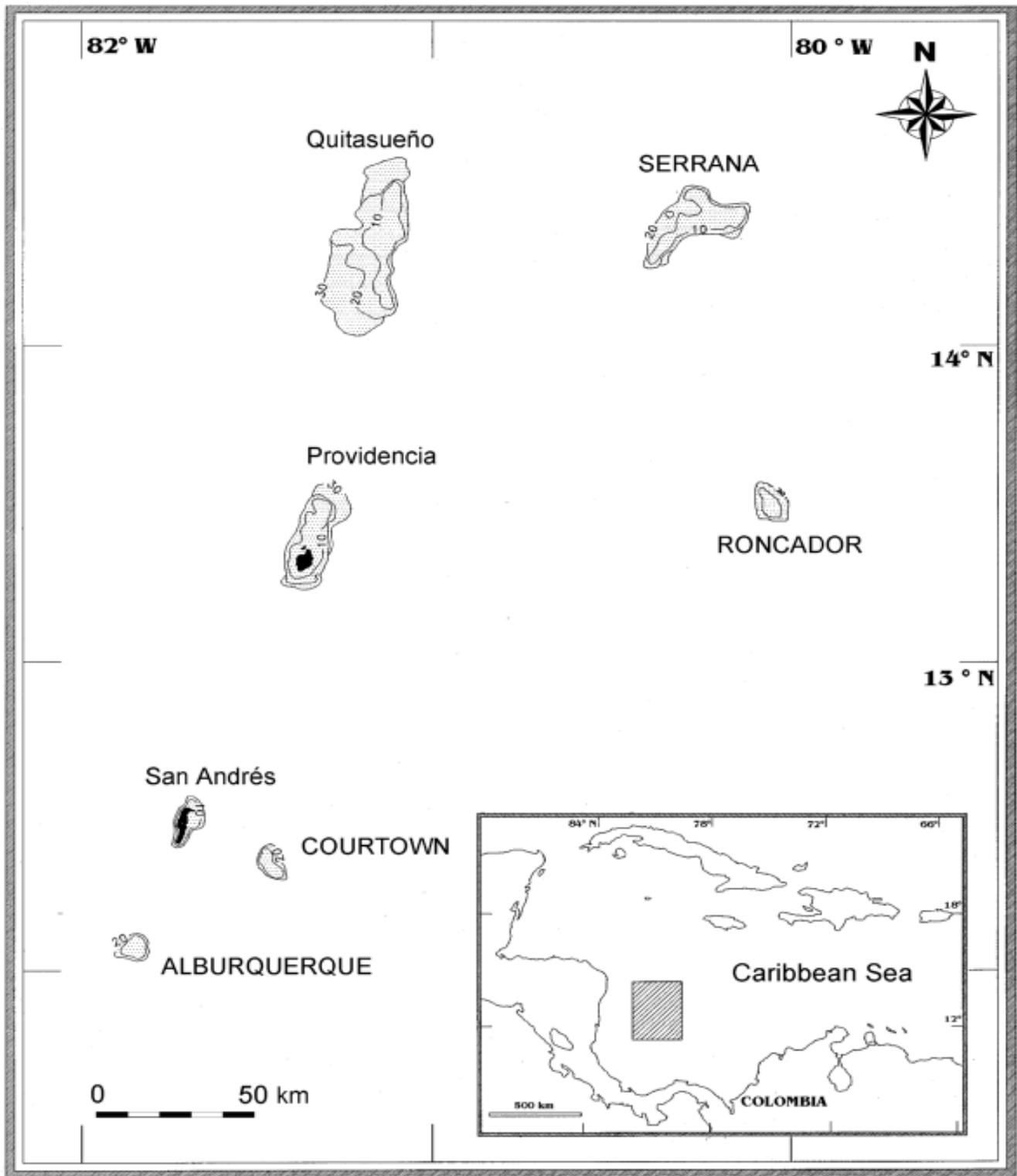


Figura 1. Localización del archipiélago de San Andrés y Providencia en el Caribe suroccidental.

La acreción arrecifal está controlada por la intensidad lumínica (dependiente, en este caso, primordialmente de la profundidad e inclinación del sustrato), por los regímenes hidrodinámicos y sedimentarios y por la topografía pleistocénica antecedente (cf. **Hubbard**, 1997). En cada complejo coralino y en cada atolón se distinguen entonces áreas de activo crecimiento arrecifal, áreas de acumulación de sedimentos y áreas en las que ninguno de estos procesos ocurre. El crecimiento de estructuras calcáreas mediado por organismos hermatípicos (corales y algas calcáreas incrustantes) es la característica más obvia de una facies arrecifal. Las variaciones en las facies se presentan en relación con la profundidad del agua, la exposición al oleaje y el efecto de la abrasión, lo cual encuentra expresión en la composición, distribución y formas de crecimiento de la biota hermatípica (**Geister**, 1977; **Hubbard**, 1988). Los factores que mayor influencia ejercen sobre la distribución de la biota hermatípica oceánica en el Caribe son la liberación de energía del oleaje predominante, proveniente del ENE, en los arrecifes de barlovento y la periodicidad de ocurrencia de huracanes y tormentas (**Adey & Burke**, 1977; **Geister**, 1977). De esa forma, las asociaciones de organismos hermatípicos sobre las crestas de los arrecifes reflejan la intensidad del oleaje predominante, dando lugar a un esquema característico de zonación arrecifal (Fig. 3), que fue reconocido por primera vez por **Geister** (1977).

Las lagunas de los complejos arrecifales y atolones del archipiélago son primordialmente áreas en las que se depositan gradualmente los sedimentos provenientes de la erosión de los arrecifes periféricos, al menos transito-

riamente (**Geister**, 1983; **Geister & Díaz**, en prensa). Sin embargo, también en las lagunas ocurren procesos de acreción arrecifal, que se expresan en el mayor o menor desarrollo de estructuras coralinas, generalmente en forma de arrecifes de parche. Por lo tanto, los fondos de las cuencas lagunares constan de llanuras sedimentarias, en algunos casos parcialmente vegetadas por macroalgas o pastos marinos, y de estructuras arrecifales constituidas por distintas asociaciones de corales y otros organismos (**Díaz et al.**, 1996; 2000). Los distintos tipos de arrecifes, tanto desde el punto de vista de las especies hermatípicas que los construyen como de su morfología, tienden a mostrar esquemas de desarrollo y distribución espacial en el interior de las lagunas que parecen responder principalmente a factores hidrodinámicos y geomorfológicos (**Díaz et al.**, 1997). En la presente contribución se analizan precisamente la composición, abundancia, arreglo espacial y morfología de los hábitats bentónicos de las lagunas de estos complejos arrecifales y atolones en relación con su tamaño, geometría, regímenes sedimentarios e hidrodinámicos y otros factores. Este análisis comparativo permitirá establecer esquemas comunes que ayuden a comprender la complejidad morfológica y ecológica de estas estructuras, así como los factores que la determinan.

Materiales y métodos

Este trabajo se basa en información obtenida conjuntamente por el autor y otros investigadores durante una serie de investigaciones llevadas a cabo en el archipiélago desde 1993 con el fin de cartografiar, caracterizar y

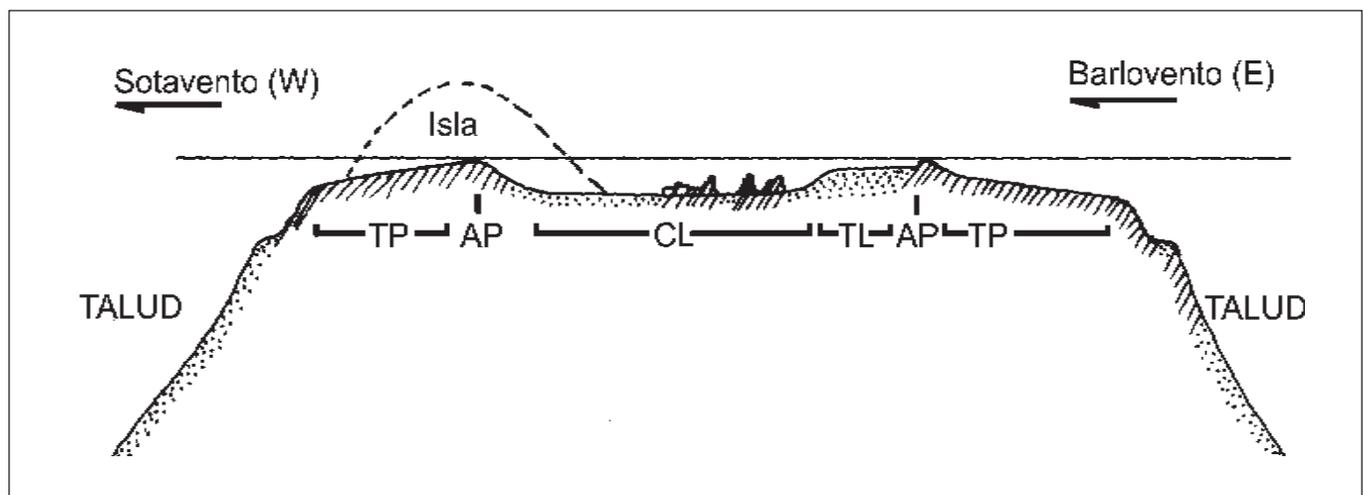


Figura 2. Perfil transversal típico del relieve en los complejos arrecifales y atolones del Archipiélago de San Andrés y Providencia. La presencia de una isla es opcional (San Andrés y Providencia); AP = Arrecife periférico o de barrera, CL = Cuenca lagunar,

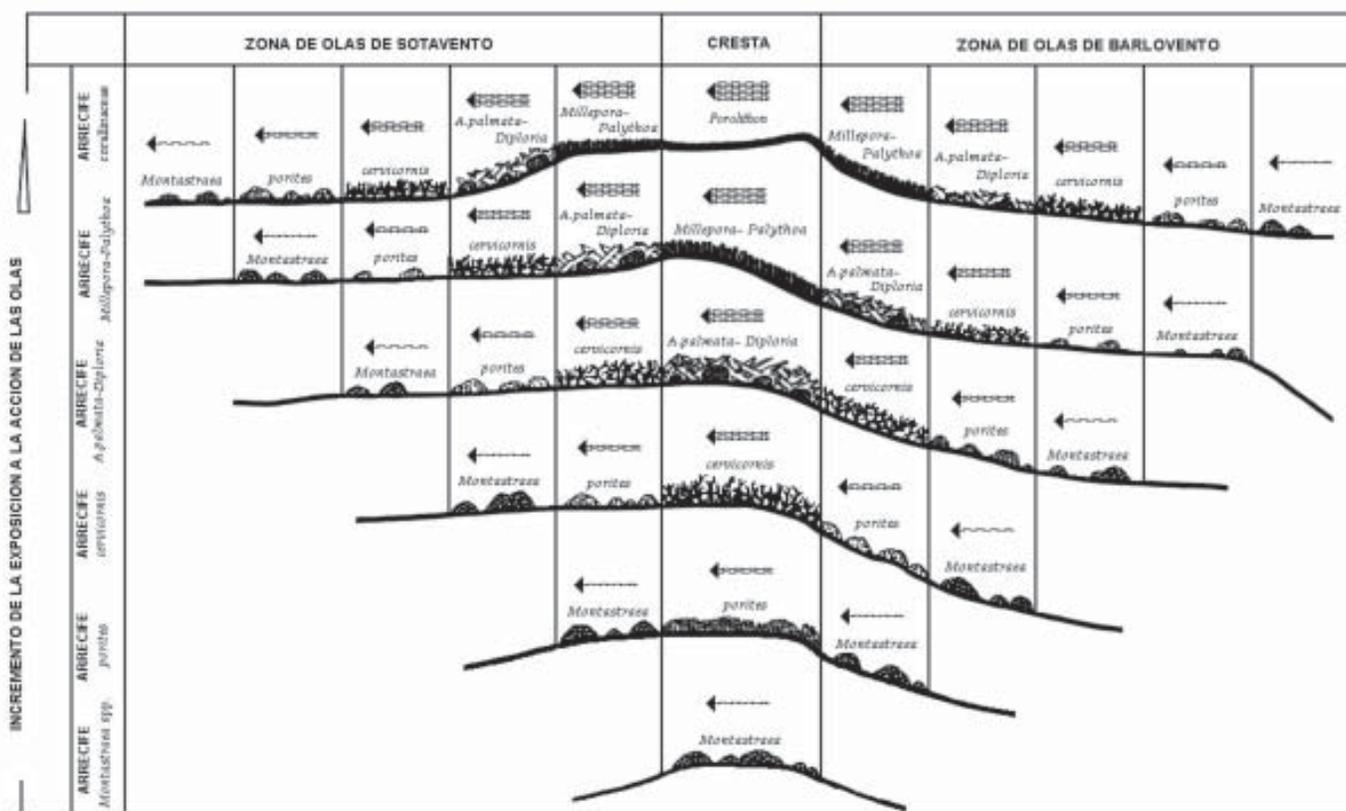


Figura 3. Esquema de zonación de los arrecifes coralinos oceánicos en el mar Caribe en función de los niveles de energía del oleaje (tomado de Díaz *et al.*, 2000, modificado de Geister, 1977).

evaluar el estado de conservación de los arrecifes coralinos (Díaz *et al.*, 1995, 1996a,b, 1997, 2000; Geister & Díaz, 1997; Sánchez *et al.*, 1997; Zea *et al.*, 1998) y praderas de pastos marinos (Díaz *et al.*, 2003) del archipiélago. Los complejos arrecifales de San Andrés y Providencia y los atolones o semi-atolones de Albuquerque, Courtown, Roncador, Serrana y Quitasueño son los objetos de estudio de este trabajo. Los bancos coralinos más septentrionales del archipiélago, Serranilla, Bajo Alicia y Bajo Nuevo no fueron incluidos por carecer de información suficiente. Además, se trata de estructuras relativamente profundas, aparentemente con escaso desarrollo arrecifal reciente y carentes de lagunas propiamente dichas o morfológicamente definidas (Geister & Díaz, en prensa).

La presencia y distribución de los hábitats, así como los rasgos topográficos y geomorfológicos y esquemas de refracción del oleaje fueron determinados preliminarmente mediante interpretación de fotografías aéreas pancromáticas obtenidas por el Instituto Geográfico “Agustín

Codazzi” en distintos años (entre 1950 y 1990) y a diferentes escalas (entre 1:21.000 y 1:60.000). La verificación en campo se realizó durante visitas y recorridos en embarcación a las distintas áreas (San Andrés: 1993, 1994, 1995, 1998 y 2001; Providencia: 1995, 1998 y 2001; Albuquerque: 1994; Courtown: 1994, 1996 y 1998; Roncador: 1995; Serrana: 1995; Quitasueño: 1998), utilizando equipo básico y autónomo de buceo y un GPS manual para el geoposicionamiento de los sitios de observación. Observaciones detalladas en 14 (Albuquerque) a 28 (Providencia) sitios representativos de los hábitats bentónicos de las lagunas fueron realizadas en cada área. Imágenes de satélite (SPOT y LANDSAT), cartas de navegación (Col. 201, 203, 204, 215, 416, 630, 631 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada colombiana y 1334 del Almirantazgo Británico), fotografías aéreas a color tomadas durante sobrevuelos de observación (1995, 1996, 1998) y algunos trabajos previos (Milliman, 1969; Geister, 1975, 1983, 1992) suministraron información complementaria. Las lagunas de

cada complejo arrecifal y cada atolón fueron sectorizadas de acuerdo con los regímenes de oleaje prevaeciente, según una escala arbitraria (de 1 = muy calmo a 5 = muy turbulento). Las áreas absolutas y relativas ocupadas por las lagunas y los distintos hábitats y tipos de arrecifes fueron determinados a partir de las áreas de los polígonos de cada cobertura en los mapas digitalizados en un sistema de información geográfica (ArcView®).

La clasificación y zonación ecológicas de los arrecifes lagunares se realizó de acuerdo con el esquema de **Geister** (1977), según el cual las asociaciones en la cresta de los arrecifes están dominadas por organismos hermatípicos característicos en relación con el grado de exposición al oleaje. De mayor a menor exposición, éstas son (ver también Fig. 3): 1) Algas rojas incrustantes (*Porolithon pachydermum*); 2) coral de fuego (*Millepora complanata*) y zoantídeos coloniales (*Palythoa* sp.); 3) coral cuerno de alce (*Acropora palmata*) y coral cerebro (*Diplora sfragosa*); 4) coral cuerno de venado (*Acropora cervicornis*); 5) coral de dedos (*Porites porites*); 6) corales masivos del género *Montastraea*. Otros tipos de hábitat presentes fueron reconocidos siguiendo la clasificación de unidades ecológicas o de paisaje sumergidos en áreas de ambientes coralinos (**Díaz et al.**, 2000). La terminología y clasificación ecológica y geomorfológica de los arrecifes varían considerablemente entre los distintos autores, pero los términos empleados en este trabajo para referirse a los tipos de arrecifes y otros hábitats se basan en la nomenclatura empleada por **Geister** (1983) & **Díaz et al.** (2000).

Resultados

En la figura 4 se ilustra esquemáticamente la morfología general de los siete complejos arrecifales. La extensión, geometría y tamaño proporcional de las lagunas con respecto al área total ocupada por el complejo arrecifal son muy variables. La mayor extensión lagunar corresponde al banco Serrana, con 237,1 km², que además equivale a casi el 74% del total de todo el atolón, y la laguna más pequeña es la del atolón Courtown, con 6,1 de 10 km² (12% de la extensión total de la plataforma insular). Altorrelieves alargados, en su mayoría de origen arrecifal (arrecifes de cinta o "barreras" internas), que se elevan casi hasta la superficie del agua en las lagunas de San Andrés, Providencia, Serrana y Quitasueño subdividen la cuenca en dos (San Andrés, Quitasueño) o tres (Providencia, Serrana) porciones o sub-cuencas semi-abiertas a cerradas. Las características más sobresalientes de las lagunas, incluyendo la extensión que ocupan los distintos tipos de hábitats bentónicos en cada una de ellas y los

niveles de energía del oleaje en sus aguas superficiales, se muestran en la tabla 1.

Las lagunas de San Andrés y Providencia, por poseer islas adyacentes de tamaño considerable, no sólo son parcialmente más cerradas, sino que reciben la influencia terrestre de aguas de escorrentía, sedimentos y nutrientes orgánicos, especialmente en las partes más meridionales de las cuencas. En términos generales, aparte de las sub-cuencas internas de Serrana y Quitasueño, y parcialmente las cuencas de San Andrés y Roncador, la cuenca mejor definida es la de Albuquerque. Los márgenes occidentales de la sub-cuenca occidental de Serrana y de toda la cuenca de Quitasueño son poco discernibles, excepto por unos cuantos segmentos del arrecife periférico que afloran a la superficie.

Los niveles de energía del oleaje en el interior de las lagunas, en función de la rugosidad de las aguas superficiales (Fig. 5), determina el grado de turbulencia o de exposición al oleaje de las crestas arrecifales y de los

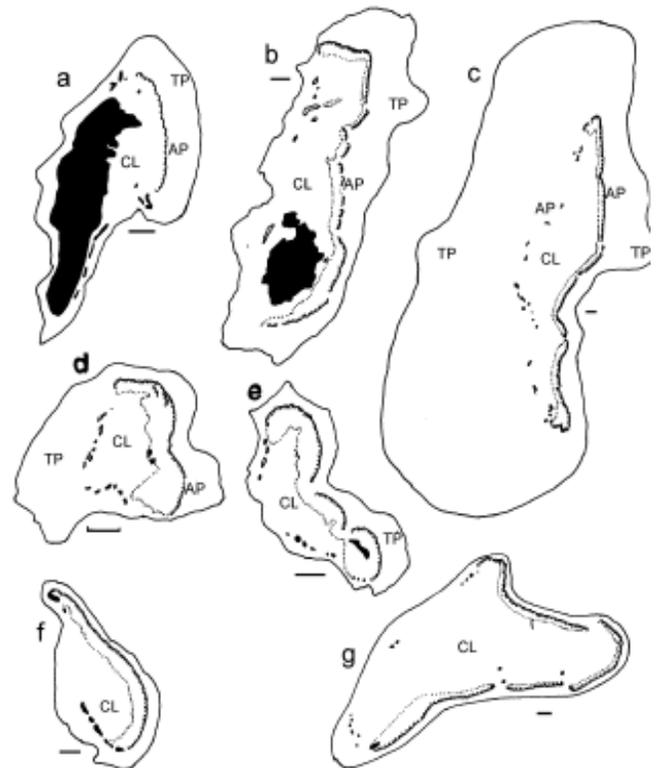


Figura 4. Diseño geométrico y configuración básica de los complejos arrecifales del Archipiélago de San Andrés y Providencia: a. San Andrés, b. Providencia, c. Quitasueño, d. Albuquerque, e. Courtown (o Bolívar), f. Roncador, g. Serrana; AP = Arrecife periférico o de barrera, CL = Cuenca lagunar, TP = Terraza pre-arrecifal y talud externo de la plataforma; la línea de escala gráfica equivale a 1500 m.

Tabla 1. Características más sobresalientes de las lagunas arrecifales, incluyendo la extensión que ocupan los distintos tipos de hábitat bentónicos en cada una de ellas y el rango de niveles de energía del oleaje en sus aguas superficiales; el área ocupada por las cuencas lagunares y los hábitats se expresan en km². En las casillas de atributos no cuantificado con números, - = ausente, * = escaso, ** = frecuente, *** = común, **** = abundante.

	S. Andrés	Provid.	Albuq.	Courtown	Roncador	Serrana	Quitás.
Área del complejo arrecifal	97,5	285,2	63,8	50,3	50,1	321,4	1.320
Área de la cuenca lagunar	8,8	85,4	9,6	6,1	17,4	237,1	146,0
Tipo de cuencas (A=abierta, SA=semi-abierta, SC=semi-cerrada, C=cerrada)	SA, SC	A, SA, SC	SC	SA	SA	SC, C, A	A,C
Profundidad promedio de las cuencas (metros)	10	11	12	10	12	12	11
Niveles de exposición al oleaje	1 -4	1 - 5	1 - 4	1 - 4	1 - 3	1 - 5	1 - 5
Fondos de arena bioturbados	2,1	46	5,1	2,5	10,5	65	106
Fondos de arena no bioturbados	2,8	6,2	1,3	1,5	1,5	69	11
Fondos de escombros coralinos grandes	1	6,6	0,6	0,6	0,7	66	5
Fondos vegetados por algas	0,3	0,2	0	0	0	17,3	0
Fondos vegetados por pastos marinos	2,1	16	<0,1	0,1	0	0	<0,1
Fondos con rodolitos	0	0	0	0	0	0	0,2
Arrecifes <i>palmata</i> - <i>strigosa</i>	0,3	3,9	0,2	0,1	0,2	2,9	4,3
Arrecifes <i>cervicornis</i>	0,1	0,8	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2
Arrecifes <i>porites</i>	0,1	0	0	0	0	0	0
Arrecifes <i>Montastraea</i>	0,1	6,7	2,1	1,4	4,5	11,5	19,2
Área relativa ocupada por arrecifes (%)	7	13,5	23	28,5	33	6	17
Arrecifes aglomerados	**	***	*	*	****	**	***
Mini-atolones	-	*	*	-	-	*	*
Arrecifes reticulares	-	**	***	***	*****	*****	*****
Pináculos	-	***	-	*	*	-	-
Arrecifes de cinta	-	-	**	-	-	*	**
“Barreras” internas	-	**	-	-	-	**	-
Arrecifes de borde costero	*	***	-	-	-	-	-

distintos tipos de hábitat allí presentes. En general, a pesar de estar relativamente abierta hacia el occidente, la laguna de Roncador posee las aguas más calmas. En cambio, el oleaje en las lagunas de Providencia y Serrana alcanza niveles de energía relativamente altos, excepto en sus respectivas sub-cuencas. En la laguna de Quitásueño se presenta un amplio gradiente de niveles de energía, concentrándose los mínimos en la zona subcentral.

La profundidad promedio del fondo arenoso es muy similar en todas las lagunas, alrededor de 11 m, y amplias zonas del fondo lagunar tienen literalmente la misma profundidad en todas ellas. No obstante, localmente se presentan profundidades superiores a 20 m localmente en Roncador y Serrana. La laguna de Albuquerque posee dos niveles batimétricos bien definidos (a 9 y 15

m), separados conspicuamente por un arrecife de cinta que recorre toda la laguna de sur a norte. Ambos niveles se distinguen claramente desde el aire por su diferente tonalidad de azul (Fig. 6).

Los fondos arenosos desnudos o cubiertos por escombros coralinos ocupan las mayores extensiones de las cuencas lagunares en todos los complejos. Una parte de ellos, particularmente las zonas más profundas o las áreas someras de aguas muy calmas, consiste en arenas finas o lodos biodetríticos con un alto grado de bioturbación, causada principalmente por crustáceos (*Callianasa* sp.) y erizos irregulares (*Meoma ventricosa*). Las arenas más gruesas, por el contrario, cubren los fondos en zonas relativamente turbulentas o cercanas a los arrecifes con rompiente, y constituyen el hábitat preferencial del caracol pala (*Strombus gigas*) y algunos bivalvos (*Tellina* spp.).

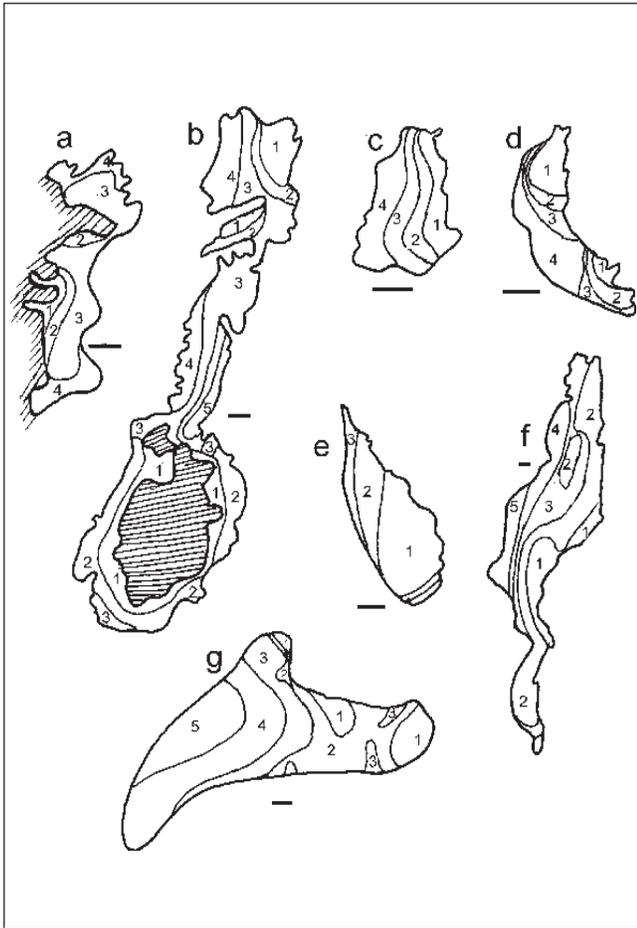


Figura 5. Distribución predominante de los niveles de energía del oleaje (1 = muy bajo a 5 = muy alto) en las lagunas de los complejos arrecifales y atolones del archipiélago de San Andrés y Providencia (determinados a partir de fotografías aéreas y observaciones en campo); la escala gráfica equivale a 1500 m.

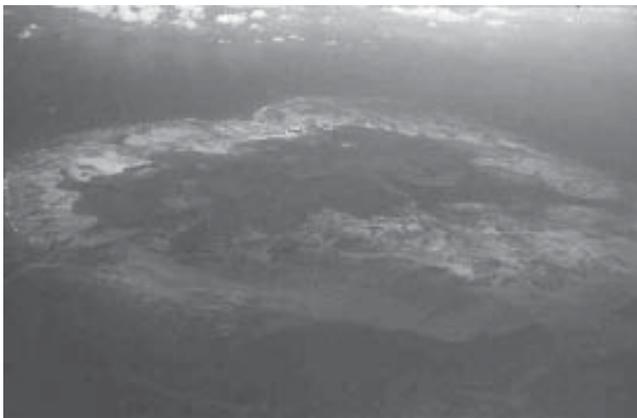


Figura 6. Panorámica aérea del atolón de Albuquerque; los dos tonos predominantes de gris en la cuenca lagunar denotan dos niveles de profundidad del fondo separados por un arrecife de cinta.

Otra proporción significativa de los fondos (6% en Serrana hasta 33% en Roncador) está ocupada por formaciones coralinas arrecifales, distribuidas más o menos irregularmente (Fig. 7). En su morfología, estos arrecifes son de diferentes tipos (ver Geister, 1983): aglomerados (parches coralinos), miniatolones, pináculos, reticulares, de cinta y “barreras” internas. Sin embargo, no todos ellos están presentes en todos los complejos arrecifales. Unos pocos mini-atolones se encuentran solamente en Providencia, Albuquerque y Serrana, y los pináculos se hallan dispersos en la pobremente definida zona de transición entre la cuenca lagunar y el tramo subcentral de la barrera coralina en Providencia. En Providencia y Serrana, arrecifes alargados, rectilíneos y muy someros forman “barreras” internas que dividen la laguna en cuencas, mientras que arrecifes de cinta meandriformes y profundos recorren buena parte de la cuenca lagunar en Albuquerque. Los parches coralinos o arrecifes aglomerados y los arrecifes reticulares son los más frecuentes y abundantes. Estos últimos consisten en crestas arrecifales angostas y alargadas que se funden entre sí para formar una red regular poligonal de arrecifes. Cada tramo de la red alcanza varias decenas de metros a lo ancho y se eleva algunos metros por encima del fondo arenoso. Las redes están interconectadas y cubren muchas hectáreas del fondo lagunar, que suele mantenerse a unos 10m de profundidad. Este diseño característico en forma de panal es bien visible desde el aire (Fig. 8). Cada segmento de la red encierra una micro-laguna, que forma una trampa de sedimentos muy efectiva. Los arrecifes reticulares muestran una clara tendencia a concentrarse en las zonas más calmas de las lagunas o en las sub-cuencas más cerradas, llegando a ocupar hasta casi el 50% del fondo en esas áreas. Los arrecifes aglomerados, por su parte, tienen un contorno irregular y generalmente se encuentran a mayor profundidad, pero muestran una orientación preferencial en el sentido del oleaje y del flujo de la corriente.

La gran mayoría de los arrecifes lagunares (incluyendo casi la totalidad de los aglomerados y reticulares) son del tipo *Montastraea*, constituidos principalmente por *M. annularis*, *M. faveolata* y *M. franksi*, especies que en conjunto representan probablemente más del 90% de la cobertura coralina de los arrecifes por debajo de 4 m de profundidad. Los arrecifes del tipo *palmata-strigosa* forman las crestas con rompiente de algunas de las “barreras” internas o de los mini-atolones en zonas expuestas a niveles de energía de oleaje relativamente altos. Los escasos arrecifes del tipo *cervicornis* tienden a formar crestas casi emergentes en zonas relativamente calmas o se hallan a unos pocos metros de profundidad en zonas más expuestas. Uno de los arrecifes de cinta de Quitasueño, que encier-

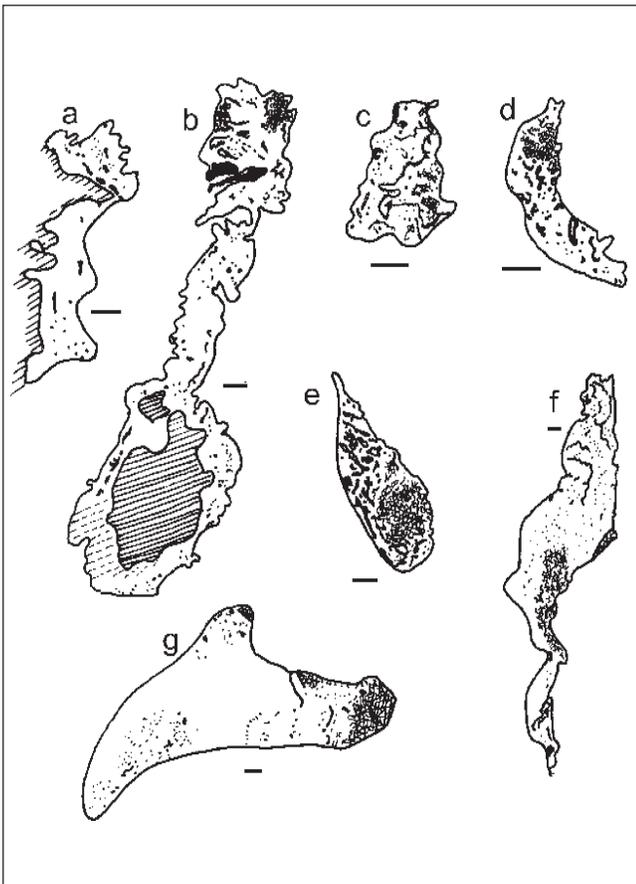


Figura 7. Las cuencas lagunares de los complejos arrecifales del Archipiélago de San Andrés y Providencia mostrando la distribución de las formaciones de coral en su interior; **a.** San Andrés, **b.** Providencia, **c.** Albuquerque, **d.** Courtown (o Bolívar), **e.** Roncador, **f.** Quitasueño, **g.** Serrana; la escala gráfica equivale a 1500 m.



Figura 8. Panorámica aérea de una porción del sector sub-central de la laguna de Quitasueño; se aprecia el patrón reticulado de los arrecifes sobre el fondo de arena adyacente; al fondo, una parte de la terraza lagunar y del arrecife periférico de barlovento.

rra completamente una pequeña sub-cuenca, esta cubierto por rodolitos, nódulos redondeados de varios decímetros de diámetro, formados por algas calcáreas incrustantes. Una situación similar no se encuentra en los demás complejos arrecifales del archipiélago. Igualmente extraordinaria es la presencia de arrecifes del tipo *porites* en la laguna de San Andrés, que en los otros complejos sólo se aprecian aisladamente en ambientes por fuera de las cuencas lagunares, especialmente en la terraza lagunar.

Sólo una proporción pequeña de los fondos de las lagunas suele estar significativamente vegetado por macroalgas, que en su mayoría son calcáreas rizofíticas verdes (*Penicillus* spp., *Ripocephalus* sp., *Halimeda* spp.). Una excepción son los extensos campos de algas pardas carnosas (*Lobophora* sp.) que cubren buena parte de los fondos arenosos en la zona central de la laguna de Serrana. De otra parte, los pastos marinos (principalmente *Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme*) forman amplias praderas solamente en los fondos lagunares adyacentes a las islas de San Andrés y Providencia, donde usualmente se entremezclan con algas.

Discusión

Aunque el origen geológico de los siete complejos arrecifales y atolones estudiados es presumiblemente el mismo, la evolución geológica ulterior de los complejos arrecifales de San Andrés y Providencia ha sido en parte muy distinta entre ellos y con respecto a la de los atolones o semi-atolones de Albuquerque, Courtown, Roncador, Serrana y Quitasueño (Geister, 1982; 1993; Geister & Díaz, en prensa). Sin embargo, dada su localización y relativa cercanía, todos ellos han estado sometidos a los mismos factores que han moldeado sus rasgos morfológicos y a las mismas condiciones que determinan la composición y estructura de las comunidades biológicas. Ello se refleja en esquemas relativamente bien definidos de diseño espacial y topográficos, como la presencia de terrazas, arrecifes periféricos de rompiente, taludes pronunciados y cuencas lagunares. Así, a pesar de las diferencias de tamaño y diseño geométrico entre los siete complejos arrecifales, todos ellos poseen cuencas lagunares más o menos definidas, y en ellas se presentan una serie de hábitats bentónicos característicos, cada uno de ellos alojando una comunidad biológica particular. Aunque algunos de los hábitats no se encuentran en todas las lagunas y otros son exclusivos de alguna de ellas en particular, y además sus cantidades relativas, proporciones y arreglo espacial varían entre las diferentes cuencas, su localización y disposición al interior de ellas, así como su forma y estructura, revelan esquemas consistentes.

Todas las cuencas lagunares están protegidas a barlovento por un arrecife de rompiente, donde las grandes olas oceánicas descargan la mayor parte de su energía. Sin embargo, el grado de protección de esa barrera depende de si es continua o presenta una o más brechas que permiten el ingreso de mayor energía a las lagunas; depende también de si su trazado es rectilíneo, convexo o cóncavo y de si posee segmentos protectores en el costado de sotavento o existen masas emergidas de tierra, permitiendo en mayor o menor grado el ingreso de olas grandes a la laguna por difracción en los extremos del arrecife. De otra parte, el grado de aislamiento de las cuencas o sub-cuencas por altorrelieves del fondo o áreas emergidas y su tamaño determinan en gran medida el nivel de energía dentro de las mismas. Por lo tanto, como se vio (Fig. 5), cada laguna muestra un esquema particular de distribución de niveles de energía de oleaje en su interior.

Como es sabido (Geister, 1977, 1982; Díaz *et al.*, 1996a, 2000), el nivel de energía determina decididamente la composición biótica y estructura de los arrecifes coralinos en función de la profundidad. La composición coralina de la mayoría de las estructuras arrecifales estudiadas tiene un claro énfasis en las especies del género *Montastraea*, reflejando la predominancia de niveles de energía muy bajos. Las crestas de estos arrecifes generalmente se mantienen por debajo de 4 m de profundidad, por lo que su presencia persiste aún en zonas donde el nivel de energía en superficie es incluso intermedio. En los lugares de muy baja energía y donde las crestas se elevan hasta 1-2 m por debajo de la superficie, se establece preferentemente *Acropora cervicornis* (arrecifes tipo *cervicornis*), pero en la actualidad sus setos están en gran proporción muertos o colapsados, debido al impacto causado por una serie de afecciones epidémicas en el transcurso de las últimas décadas (Zea *et al.*, 1998; Díaz *et al.*, 2000). En lugares de media a alta exposición al oleaje, estas crestas están compuestas por setos de *A. palmata* y grandes colonias masivas de *Diploria strigosa* (arrecifes tipo *strigosa-palmata*), como es generalmente el caso de los mini-atolones y “barreras” internas.

Los arrecifes tipo *porites*, cuyo nivel de energía se sitúa supuestamente entre los arrecifes de tipo *Montastraea* y *cervicornis* (Geister, 1977, 1982; Díaz *et al.*, 2000), y cuya presencia generalizada era de esperarse, se encuentran únicamente en la laguna de San Andrés. Esta “anomalía” hace sospechar la existencia de otros factores distintos a la energía del oleaje y la profundidad que controlen adicionalmente la distribución de esta especie. Littler *et al.* (1989) opinan que la intensidad del “pastoreo” por parte de peces loro (Scaridae) puede ejercer ma-

yor influencia que los factores físicos en los esquemas de zonación de las especies de *Porites* en el Caribe. Wallace & Schafersman (1977) han sugerido también la posibilidad de que los arrecifes tipo *porites* representen un estado temprano de la sucesión de especies en los arrecifes de parche del Caribe. Aunque no hacen parte de las formaciones arrecifales coralinas, los fondos duros formados por rodolitos de algas incrustantes son también una unidad “anómala”, característica de ciertos arrecifes de cinta únicamente en Quitasueño. La estructura basal de estos arrecifes parece haber sido construida por corales escleractinios, probablemente *A. cervicornis*, cuyos setos quizás fueron colapsados y destruidos por los efectos de uno o más huracanes y posteriormente recubiertos por las algas. El tamaño y la forma de estos rodolitos se semejan mucho a los descritos por Gischler & Pisera (1999) en los arrecifes de Belice.

Como era de esperarse, teniendo en cuenta que las cuencas lagunares son esencialmente ambientes de depositación y acumulación de sedimentos originados en los arrecifes periféricos, la mayoría de los fondos de las lagunas están cubiertos por arenas biodetríticas. Sin embargo, es evidente que la mayoría de los granos que componen estas arenas no tiene un origen coralino, sino que se trata principalmente de hojuelas o sus fragmentos de algas verdes calcáreas del género *Halimeda*. Estas algas son muy abundantes en algunas de las lagunas, tanto en los arrecifes como en las praderas de pastos marinos e incluso formando praderas algales con otras especies rizofíticas, por lo que seguramente gran parte de estos sedimentos son originados dentro de las lagunas. Se ha estimado que *Halimeda* puede aportar más del 80% a la producción de carbonatos en los arrecifes de coral del Caribe (Hillis, 1997). Los fondos de sedimentos bioturbados se localizan claramente en las áreas más profundas de las lagunas o también en zonas someras pero con niveles de energía de oleaje muy bajos. Por el contrario, los fondos cubiertos por arenas de grano más grueso, incluso hasta más de 12 m de profundidad, predominan en las áreas más expuestas de las lagunas.

Las praderas de pastos marinos son ambientes exclusivos de las zonas lagunares aledañas a islas o cayos de cierto tamaño, en ambientes poco a medianamente expuestos a la acción del oleaje. Ello sugiere claramente que el desarrollo de las praderas depende, de alguna manera, de la cercanía de ma-

sas emergidas de tierra. Los pastos marinos, como plantas superiores que son, adquieren del suelo gran parte de los nutrientes requeridos para su metabolismo, especial-

mente nitrógeno y fósforo (Phillips & Meñez, 1988), los cuales en buena parte seguramente son aportados por las aguas de escorrentía que lavan los suelos de las islas. Es probable que tales nutrientes estén en cantidades muy limitadas en los sedimentos lagunares alejados de las islas, por lo que no son aptos como suelo para el desarrollo de las fanerógamas. La presencia de pastos marinos tiene consecuencias muy importantes para la comunidad biótica bentónica. Se ha demostrado que la fauna asociada a este tipo de hábitats es de dos a 25 veces más diversa y abundante que la de los fondos de arena circundantes (Orth *et al.*, 1984; ver también Díaz *et al.*, 2003).

En suma, resulta evidente que la presencia, abundancia y distribución espacial de los distintos hábitats bentónicos dentro de las cuencas lagunares son controlados por una serie de factores, siendo el nivel de energía del oleaje, combinado con la profundidad, el más importante para el caso de los tipos de arrecifes y la zonación coralina, algo ya ampliamente documentado (Adey & Burke, 1977; Geister, 1977, 1983, 1992; Wallace & Schafersman, 1977; Díaz *et al.*, 1997). Estos factores, pero también la presencia de masas emergidas de cierto tamaño y la ocurrencia de grandes perturbaciones ambientales como los huracanes, cuyos efectos parecen ser más drásticos y frecuentes en los atolones más septentrionales del archipiélago (Geister, 1993; Díaz *et al.*, 1997), son los principales responsables de la configuración ecológica actual de las lagunas. De esta forma, es posible concebir un modelo predictivo acerca de los tipos de hábitat bentónicos presentes en las lagunas arrecifales del archipiélago bajo una combinación particular de tales factores. Dicho modelo es fácilmente entendible mediante una clave dicotómica que conduce a la identificación "taxonómica" de los principales hábitats bentónicos de las lagunas arrecifales del archipiélago y muy probablemente de otros complejos arrecifales en el Caribe:

- 1a. Fondo cubierto por sedimento 2
- 1b. Fondo coralino (arrecife) 7
- 2a. Nivel de energía del oleaje alto
a muy alto (4-5) 3
- 2b. Nivel de energía del oleaje muy
bajo a medio (1-3) 5
- 3a. Profundidad del agua entre <1 y 5 m 4
- 3b. Profundidad del agua mayor a 5 m 6
- 4a. Con isla adyacente **Playa y fondo arenoso**
- 4b. Sin isla adyacente **Fondo de arena no bioturbado**

- 5a. Profundidad del agua entre <1 y 3 m
..... **Fondo arenoso bioturbado con algas**
- 5b. Profundidad del agua mayor a 3 m
..... **Fondo areno-lodoso bioturbado**
- 6a. Con isla adyacente **Pradera de pastos marinos**
- 6b. Sin isla adyacente
..... **Fondo arenoso con o sin algas**
- 7a. Nivel de energía del oleaje medio a muy alto (3-5) 8
- 7b. Nivel de energía del oleaje muy bajo a bajo (1-2) 9
- 8a. Profundidad de agua entre 0 y 4 m 10
- 8b. Profundidad del agua mayor a 4 m 11
- 9a. Cresta del arrecife con rompiente
..... **arrecife tipo *cervicornis***
- 9b. Cresta del arrecife sin rompiente
..... **arrecife tipo *Montastraea***
- 10a. Cresta del arrecife con rompiente
..... **arrecife tipo *strigosa-palmata***
- 10b. Cresta del arrecife sin rompiente
..... **arrecife tipo *cervicornis* (o *porites*)**
- 11a. Profundidad del agua entre 4 y 6 m
..... **arrecife tipo *cervicornis***
- 11b. Profundidad del agua mayor a 6 m
..... **arrecife tipo *Montastraea***

En cuanto a la morfología de los arrecifes, no es del todo evidente una gradación de los distintos tipos morfológicos a lo largo de los principales gradientes físicos, por lo que no es posible reconstruir una posible secuencia evolutiva de su desarrollo. Sin embargo, algunos de los tipos morfológicos de arrecifes mejor representados en las lagunas, como los aglomerados y los reticulares, sí muestran esquemas de distribución espacial definidos, que parecen estar también relacionados con las características fisiográficas e hidrográficas. La forma alargada de los arrecifes aglomerados en una dirección preferencial parece indicar la importancia de la intensidad y dirección del oleaje y las corrientes como factores que controlan la morfología arrecifal. Brown & Dune (1980) sugirieron que incluso corrientes y oleajes de poca intensidad pero constantes pueden determinar la orientación y forma alargada de los arrecifes de parche. Roberts & Murray (1983) & Díaz *et al.* (1997) también han resaltado el papel que juegan el

oleaje y sus esquemas de refracción en la orientación preferencial de los arrecifes. La disposición preferencial de los arrecifes de cinta en sentido transversal a la corriente y al oleaje predominante en las lagunas estudiadas es seguramente también una consecuencia de estos factores.

Los arrecifes reticulares están claramente más desarrollados en las áreas de mínima turbulencia, como lo muestra la situación de las sub-cuencas semi-cerradas de Serrana y el área sub-central de Quitasueño. Ello, sin embargo, no descarta la posibilidad de que el patrón reticulado de desarrollo de estos arrecifes pueda estar condicionado por la topografía kárstica de las calizas del Pleistoceno que subyacen el fondo de las lagunas. El patrón reticulado de ciertas estructuras coralinas en los arrecifes de Belice está efectivamente controlado por una topografía kárstica precedente (Macintyre *et al.*, 2000).

Toda la configuración actual de los arrecifes lagunares del archipiélago se ha desarrollado durante el Holoceno, y tales arrecifes se han levantado desde un nivel basal que probablemente se sitúa cerca de la profundidad máxima actual de las lagunas (aproximadamente 25 m). Es imposible inferir los rasgos topográficos heredados del relieve del Pleistoceno de la topografía actual de las lagunas, pero es muy posible que una parte de los arrecifes se haya desarrollado sobre las cimas de arrecifes pleistocénicos, como es el caso de formaciones coralinas actuales en La Florida (Shinn *et al.*, 1977) y Belice (Halley *et al.*, 1977; McIntyre *et al.*, 2000). De otra parte, teniendo en cuenta que el tiempo transcurrido desde que la topografía pleistocénica fue inundada por el nivel marino actual es geológicamente bastante corto, la acreción arrecifal reciente ha sido modesta (Geister, 1983), como lo demuestra el hecho de que sólo unos pocos de los arrecifes lagunares se elevan actualmente hasta la superficie del agua.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda y colaboración de numerosas personas e instituciones, a las cuales quiero expresar mis sinceros agradecimientos. Los colegas y amigos L.M. Barrios, J. Garzón-Ferreira, G. Díaz-Pulido, M. López-Victoria, J.A. Sánchez, y S. Zea (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, Santa Marta, Colombia) participaron en las expediciones realizadas en 1993, 1994, 1995 y/o 1998 y aportaron valiosas ideas. Mi especial agradecimiento a J. Geister (Universidad de Berna, Suiza) por compartir su experiencia en el campo y por sus sugerencias y aportes sobre la geomorfología arrecifal. A la tripulación del B/I Ancón, especialmente a su capitán, J.E. Polo, por su incondicio-

nal ayuda y colaboración a bordo. Las actividades que nutrieron el presente trabajo contaron con la generosa ayuda y financiación de INVEMAR, COLCIENCIAS, CORALINA, Universidad Nacional de Colombia y Ministerio Suizo de Relaciones Exteriores.

Bibliografía

- Adey, W.H. & R.B. Burke. 1977. Holocene bioherms (algal ridges and bank-barrier reefs) of the eastern Caribbean. *Geol. Soc. Amer. Bull.* **87**: 95-109.
- Brown, B.E. & R.P. Dunne. 1980. Environmental controls of patch ref. growth and development. *Mar. Biol.* **51**: 381-388.
- Darwin, C. 1851. The structure and distribution of coral reefs. (Reprinted by University of California Press, Berkeley & Los Angeles 1962, 214 pp., 5 figs., 3 pls.).
- Díaz, J. M., J. Garzón-Ferreira & S. Zea. 1995. Los Arrecifes Coralinos de la Isla de San Andrés, Caribe Colombiano: Estado Actual y Perspectivas para su Conservación. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección "Jorge Álvarez LLeras" **7**, Bogotá, 147 p.
- _____, G. Díaz-Pulido, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, J.A. Sánchez & S. Zea. 1996a. Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe colombiano, I: Complejos arrecifales oceánicos. INVEMAR, Publ. Esp. **2**, 83 p.
- _____, J. A. Sánchez, S. Zea & J. Garzón. 1996b. Morphology and marine habitats of two southwestern Caribbean atolls: Albuquerque and Courtown. *Atoll Res. Bull.* **435**: 1-33.
- _____, J.A. Sánchez & J. Geister. 1977. Development of lagoonal reefs in oceanic reef-complexes of the southwestern Caribbean. *Proc. 8th Coral reef Symp. Panama* **1**: 779-784.
- _____, L. M. Barrios, M. H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G. H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Ángel, F. Zapata & S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR, Publ. Esp. **5**, 176 p.
- _____, L.M. Barrios & D.I. Gómez-López. 2003. Las praderas de pastos marinos en el Caribe colombiano: Distribución y estructura de un ecosistema estratégico. INVEMAR, Publ. Esp. **10**, 145 p.
- Díaz-Pulido, G. & J.M. Díaz. 1997. Algal assemblages in lagoonal reefs of Caribbean oceanic atolls. *Proc. 8th Coral reef Symp., Panama* **1**: 827-832.
- Geister, J. 1975. Riffbau und geologische Entwicklungsgeschichte der Insel san Andrés (westliches Karibisches Meer, Kolumbien). *Stutt. Beitr. Naturk. (Geol., Paläont.)* **15**: 1-203.
- _____. 1977. The influence of wave exposure on the ecological zonation of Caribbean coral reefs. *Proc. 3th Int. Coral Reefs Symp. Miami* **1**: 23-29.
- _____, 1983. Holozäne westindische Korallenriffe: Geomorphologie, Ökologie und Fazies. *Facies* **9**: 173-284.
- _____, 1992. Modern reef development and Cenozoic evolution of an oceanic island/reef complex: Isla de Providencia (Western caribbean Sea). *Facies* **27**: 1-70.

- _____ & **J.M. Díaz** 1997. A field guide to the oceanic barrier reefs and atolls of the southwestern Caribbean (Archipelago of San Andres and Providencia, Colombia). Proc. 8th Int. Coral Reefs Symp. Panama **1**: 235-262.
- _____. En prensa. Reef environments and geology of an oceanic archipelago: San Andrés, Old providence and sta. Catalina (Caribbean Sea, Colombia). Ingeominas, Bogotá.
- Gischler, E. & A. Pisera.** 1999: Shallow water rhodoliths from Belize reefs. N. Jb. Geol. Paläont. Abh. **214**/1-2: 71-93.
- Halley, R., E.A. Shinn, J.H. Hudson & B. Lidz.** 1977. Recent and relict topography of Boo Bee Patch Reef, Florida. Proc. 3th Int. Coral reefs Symp. Miami **2**: 29-35.
- Hillis, L.** 1997. Coralgal reefs from a calcareous green alga perspective, and first carbonate budget. Proc. 8th Int. Coral reef Symp. Panama **1**: 761-766.
- Hubbard, D.K.** 1988. Controls of modern and fossil reef development: common ground for biological and geological research. Proc. 6th Int. Coral reefs Symp. **1**: 243-252.
- _____. 1997. Reefs as dynamic systems. Cap. 3 en Ch. Birkeland (Ed.), Life and death of coral reefs, Chapman & Hall, New York, pp. 43-67.
- Littler, M.M., P.R. taylos & D.S. Littler.** 1989. Complex interactions in the control of coral zonation on a Caribbean reef flat. *Oecologia* **80**: 331-340.
- Macintyre, I.G., W. F. Precht, & R. B. Aronson.** 2000. Origin of the Pelican Cays ponds, Belize. *Atoll Res. Bull.* **466**: 1-11.
- Milliman, J.D.** 1969. Four southwestern Caribbean atolls: Courtown Cays, Albuquerque Cays, Roncador Bank and Serrana Bank. *Atoll Res. Bull.* **129**: 1-22.
- _____ & **P.R. Supko.** 1968. On the geology of san Andrés Island, western Caribbean. *Geol. En Mijnbouw.* **47**: 102-105.
- Orth, R., K. Heck & J. Montfrans.** 1984. Faunal communities in seagrass beds: A review of the influence of plant structure and prey characteristics on predator-prey relationships. *Estuaries* **7** (4a): 339-350.
- Roberts, H.H. & S.P. Murray.** 1983. Controls on reef development and the terrigenous-carbonate interface on a shallow shelf, Nicaragua (Central America). *Coral Reefs* **2**: 71-80.
- Phillips, R.C & E.G. Meñez.** 1988. Seagrasses. *Smiths. Contrib. Mar. Sci.* **34**: 1-89.
- Sánchez, J.A., J.M. Díaz & S. Zea.** 1997. Gorgonian communities in two contrasting environments on oceanic atolls of the southwestern Caribbean. *Bull. Mar. Sci.* **61**(2): 453-465.
- Shinn, E.A., J.H. Hudson, R.B. Halley & B. Lidz.** 1977. Topographical control and accumulation rate of dome Holocene coral reefs; South Florida and Dry Tortugas. Proc. 3th Int. Coral Reef Symp. Miami **2**: 1-7.
- Wallace, R.J. & S.D. Schafersman.** 1977. Patch-reef ecology and sedimentology of Glovers Reef Atoll, Belize. En: reefs and related carbonates-ecology and sedimentology. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Studies in Geology* **4**: 37-52.
- Zea, S., J. Geister, J. Garzón-Ferreira & J.M. Díaz.** 1998. Biotic changes in the reef complex of San Andrés Island (Southwestern Caribbean Sea, Colombia) occurring over nearly three decades. *Atoll. Res. Bull.* **456**: 1-30.

Recibido el 31 de agosto de 2004.

Aceptado para su publicación el 31 de enero de 2005.

LA REDISTRIBUCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR Y LA LLUVIA DENTRO DE PLANTACIONES DE CAFÉ (*COFFEA ARABICA* L.)

por

Álvaro Jaramillo-Robledo¹

Resumen

Jaramillo-Robledo, A. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 371-382. 2005. ISSN 0370-3908.

Se presenta una revisión de los estudios de microclima en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) a libre exposición solar y bajo diferentes sombríos para las condiciones de Colombia. Se describe la redistribución de la radiación solar, de los balances de energía, la temperatura de la planta y del cultivo. Se presentan resultados sobre los componentes del balance hidrológico y transporte de nutrimentos dentro de los cafetales.

Palabras clave: *Coffea arabica*, balance de radiación solar, balance de energía, balance hídrico, transporte de nutrimentos.

Abstract

The following review presents a series of studies on microclimate of non-shaded and shaded conditions of coffee plantations (*Coffea arabica* L.) in Colombia. Likewise, the re-distribution of solar radiation and the temperature, as well as the energy balance, of the coffee plant and the crop are described. The results on the components of water balance and transport of nutrients within the coffee plantations are reported.

Key words: *Coffea arabica*, solar radiation, energy balance, water balance, nutrients.

Introducción

El clima se puede estudiar en diferentes escalas del espacio y del tiempo y en general se consideran tres aproximaciones:

En una escala macroclimática, el clima se estudia en grandes áreas y está determinado por factores tales como la latitud, las corrientes marinas, la altitud, el relieve, las distancias desde el océano, grandes movimientos de masas de aire y otros. Como ejemplos se pueden citar la Zona

¹ Disciplina de Agroclimatología. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Chinchiná-Caldas-Colombia. Correo electrónico: alvaro.jaramillo@cafedecolombia.com

de Confluencia Intertropical, el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y los ciclones tropicales, pues todos ellos influyen en las condiciones climáticas y estacionales en áreas extensas de la Tierra.

En escala mesoclimática (Topoclimática), el clima se estudia en regiones más pequeñas y se hace énfasis en las condiciones fisiográficas de la región, por ejemplo, la altura sobre el nivel del mar, la pendiente del terreno, la proximidad a un valle o a una montaña, la orientación de las vertientes con respecto a la exposición solar o a la dirección de los vientos, las circulaciones de valle-montaña, los lagos, lagunas y embalses, la presencia de áreas boscosas o de desierto; estas características tienen incidencia en los climas regionales.

En escala microclimática se estudia la interacción de los mecanismos, los procesos y los estados que ocurren en el suelo, en la planta y en la atmósfera. Se refiere al clima de pequeñas áreas y está condicionado principalmente por la cobertura del terreno, clase de cultivo, distancias de siembra, arquitectura de la planta y sombrío. Entre las aplicaciones específicas de la microclimatología en la agricultura están la determinación de los perfiles de la velocidad del viento, temperatura, humedad atmosférica y dióxido de carbono dentro del cultivo; conocer los flujos de radiación solar y de energía dentro de las plantaciones; predecir la temperatura y la humedad en el suelo; estimar la evaporación y la evapotranspiración de las plantas; determinar la actividad fotosintética e intercambio del CO₂ entre la planta y la atmósfera; proteger a los cultivos de fuertes vientos y temperaturas extremas (Ayra, 1988).

Uno de los trabajos pioneros registrados sobre el microclima en los cafetales bajo las condiciones de Kenia, lo publicó Kirkpatrick (1935); allí se comparan las condiciones climáticas dentro de los cafetales con los registros de la estación climática externa. En Méjico, Barradas & Fanjul (1986), estudiaron las condiciones dentro de los cafetales bajo sombra y a libre exposición solar. En Colombia los primeros estudios se publicaron en 1951 para cafetales con sombrío de guamos y en ellos se analizaron las condiciones de radiación solar, temperatura del aire y del suelo, humedad relativa, viento y lluvia (Schroeder, 1951a, 1951b; Bonilla, 1952a, 1952b; Trojer, 1953, 1955). Estudios más recientes en cafetales a libre exposición solar relacionan los balances de radiación solar, balances de energía, balances hídricos y temperatura de la planta (Castillo *et al.*, 1996, 1997; Escobar & Jaramillo, 1983; Giraldo & Jaramillo, 2004; Gómez & Jaramillo, 1974; Jaramillo, 1976, 1986, 2003 ; Jaramillo & Cháves, 1998, 1999; Jaramillo & Escobar, 1984; Jaramillo & Gómez, 1989).

Se presenta una revisión de los estudios de microclima realizados por el Centro Nacional de Investigaciones de Café –Cenicafé, Federacafé– para las condiciones de Colombia; se describen las condiciones de clima dentro de diferentes agroecosistemas de cafetales con sombrío y a libre exposición solar; se hace énfasis en los balances de radiación solar, balances de energía, balances de agua y el transporte de nutrientes.

Balance de radiación solar

La disponibilidad de la radiación solar necesaria para los procesos físicos y biológicos que ocurren en un cultivo está determinada en primer término por el macroclima de la región (latitud y día del año), por las condiciones de nubosidad que determinan las cantidades de radiación directa y difusa, y por las propiedades del follaje como el tamaño y disposición de las hojas, estructura de la planta, distancia de siembra; estas características determinan cambios en los procesos de evaporación, calentamiento del aire y calentamiento del suelo.

El balance de radiación solar sobre una superficie se puede expresar de la siguiente manera (Jaramillo & Dos Santos, 1980):

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot (K_D \downarrow + K_d \downarrow) + (L \uparrow - L \downarrow)$$

En donde:

R_n radiación neta

K_D↓ radiación directa de onda corta (Longitud de onda desde 300 a 3000 nanómetros, nm) que entra a la superficie

K_d↓ radiación difusa de onda corta que entra a la superficie

L↑ radiación de onda larga (mayor de 3000 nm) emitida por la superficie

L↓ radiación de onda larga que llega a la superficie

α albedo, es la proporción de radiación de onda corta reflejada por la superficie

Dependiendo de las condiciones de nubosidad las proporciones de la radiación solar incidente (radiación solar observada / radiación solar astronómica) en la superficie terrestre varían en cada localidad. Para Colombia estas proporciones están entre un valor mínimo del 20% en Bahía Solano –Chocó– y un 68% en Uribia –Guajira (Tabla 1).

Tabla 1. Relación entre la radiación solar observada y la astronómica para algunas localidades de Colombia. (Simbaqueva *et al.*, 1986).

Localidad (Departamento)	Transmisividad, %
Bahía Solano (Chocó)	20
El Mira (Nariño)	23
Villarrica (Tolima)	23
Florencia (Caquetá)	33
Moniquirá (Boyacá)	35
Manizales (Caldas)	37
Tibaitatá (Cundinamarca)	38
Chinchiná (Caldas)	42
Palanquero (Cundinamarca)	45
Venecia (Antioquia)	47
Pueblo Bello (Cesar)	49
Cabo de La Vela (Guajira)	59
Manaure (Guajira)	64
Uribia (Guajira)	68

Una propiedad muy importante en el balance de radiación de los cultivos es el albedo, definido como la relación entre la radiación reflejada por una superficie y el total de la radiación incidente sobre la misma. El albedo varía con el tipo de superficie, la latitud, el ciclo estacional, estado nutricional de la planta y otros factores. Esta proporción de radiación no es utilizada dentro de los procesos de fotosíntesis y transpiración de las plantas. En la Tabla 2 se relacionan algunos valores de albedo para diferentes superficies. Un valor frecuente para la mayoría de los cultivos está entre el 10 y 20%.

Tabla 2. Albedo en varios tipos de superficies (Rosenberg, 1974, Sellers, 1974, Ayoade, 1983).

Superficie	Albedo %
Suelo negro	8-14
Bosque coníferas	5-15
Bosque tropical	15-20
Cultivos verdes	15-25
Desierto	25-30
Agua	5-10
Nieve	80-95
Hielo	50-70
Nube	36-90
La Tierra	30

Las mediciones de la radiación solar en cafetales se refieren a la radiación de onda corta y la radiación fotosintéticamente activa (Longitudes de onda entre 400 y 400 nm). No se han medido las cantidades de radiación de onda larga dentro de los agroecosistemas.

El balance de radiación solar en un cafetal a libre exposición solar indica que el 15% es reflejada por el cultivo(albedo), un 75 % es retenida por la planta y un 10% incide en la superficie del suelo. Las proporciones anteriores varían con el manejo del cultivo, las distancias de siembra, entre otras variables.

Los valores de albedo en *Coffea arabica* L, dependen de la elevación solar; a mayor elevación solar los valores son más bajos. Los valores encontrados para cafetales a libre exposición solar son semejantes a los medidos en otros cultivos como papa, pasto, caña de azúcar (Montieth, 1969) y los medidos en bosques, manzanos y cítricos (Jarvis *et al.*, 1976; Landsberg *et al.*, 1973; Proctor *et al.*, 1972; Stanhill, *et al.*, 1966) los cuales se varían entre el 10 y 20%.

La radiación solar dentro del árbol

Las comunidades vegetales presentan un sistema de capas sucesivas de hojas parcialmente superpuestas y sombreadas unas con otras. La luz incidente es absorbida progresivamente al pasar a través de las capas. Debido a la heterogeneidad de la arquitectura de la planta, el estudio de la transferencia de radiación solar dentro del follaje es difícil de explicar y por tal razón se tiende a considerar simplificaciones. Una generalización muy aceptada considera el follaje horizontal uniforme y establece que las características de su disposición foliar y de radiación no cambian dentro de las capas horizontales y solamente dependen del índice de área foliar.

Uno de los primeros modelos para explicar la radiación solar dentro de los cultivos fue el propuesto por Monsi y Saeki en 1960 (Saeki, 1993)

$$K\downarrow_n = (1-\alpha) \cdot K\downarrow \cdot e^{-k \cdot IAF}$$

En donde:

$K\downarrow_n$ radiación de onda corta incidente dentro de un nivel en el árbol.

α albedo para radiación de onda corta.

$K\downarrow$ radiación de onda corta incidente en la parte externa del árbol.

k Coeficiente de extinción o tasa de absorción de la radiación solar de onda corta por unidad de Índice de Área Foliar (IAF).

IAF Índice de área foliar (IAF= área de hojas/área de terreno).

En la Figura 1 se observa el comportamiento de la radiación solar dentro de un árbol de café.

La tasa de absorción de energía debida al follaje (coeficiente de extinción, k) tiende a ser mayor en especies de hoja ancha y relativamente horizontales (k entre 0,6 y 0,9) y a presentar menores valores en especies de hojas pequeñas y erectas (k entre 0,3 y 0,5).

En árboles de café de la variedad catuaí y para las condiciones de Brasil, **Jaramillo & Dos Santos** (1980), encontraron un valor para el coeficiente de extinción de 0,51. En observaciones realizadas en Chinchiná –Colombia–, **Castillo et al.** (1997), aplicaron el modelo de Monsi y Saeki para la Radiación Fotosintéticamente Activa (0,3 a 3.000 mm, RFA) estimando coeficientes de extinción (k), entre 0,41 y 0,60 para la radiación difusa y valores de 0,51 a 0,72 para la radiación directa.

La proporción de radiación solar retenida por los árboles de café variedad caturra es del orden de 75% para valores promedio diarios. Los valores de radiación interceptada por el árbol están modificados por la proporción de ramas y frutos presentes, por el grado de defoliación, el estado vegetativo, la edad de la planta, la disposición de hojas y ramas y la distancia de siembra. Para densidades de siembra de 10.000 plantas/ha de café variedad Colombia de 3,5 años de edad se encontró una interceptación del 97% (**Castillo et al.**, 1996, 1997).

La capa externa de hojas en un árbol de café absorbe la mayor proporción de la radiación solar incidente, por ejemplo en árboles de café de la variedad Borbón amarillo el primer estrato de hojas interceptó el 93% de la radiación incidente en la parte externa (**Jaramillo & Dos Santos**, 1980).

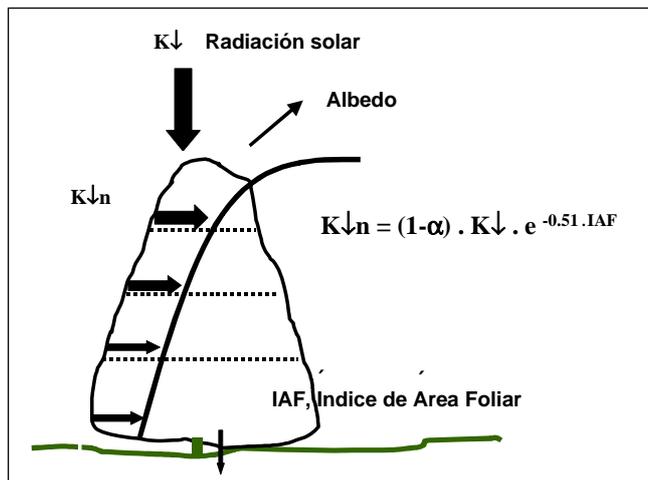


Figura 1. Variación de la radiación solar dentro de un árbol de café (**Jaramillo & Dos Santos**, 1980).

La proporción de radiación incidente en la superficie del suelo de una plantación de café con alta densidad de siembra y cobertura total sobre el terreno es muy baja, los valores medidos varían un 6 al 16% del total de la radiación incidente en la parte externa del cultivo.

Balance de energía

La radiación neta es la diferencia entre la radiación solar entrante y la saliente tanto de onda corta como de onda larga. Un balance de energía dentro del cultivo permite conocer de que manera las plantas o el suelo utilizan y distribuyen la radiación neta en sus diferentes componentes.

Un balance de energía puede ser expresado así (**Rosenberg**, 1974):

$$R_n = H + \lambda E + G + P + M$$

- R_n radiación neta
- H flujo de calor sensible, utilizado en calentar el aire.
- λE flujo de calor latente empleado en evaporar el agua (λ , calor latente de evaporación, E, es la cantidad de agua evaporada)
- G flujo de calor en el suelo.
- P, M representa la fotosíntesis y otros intercambios de energía (actividad metabólica y almacenamiento de calor en los tejidos de la planta).

En medidas realizadas en Cenicafé (Latitud Norte 05°00', Longitud Oeste 75° 36', Altitud 1.310 m) dentro de cafetales de *Coffea arabica* L. variedad caturra, se observó como valor promedio que un 67% de la radiación neta se emplea en la evapotranspiración, un 30% en calentar el aire circundante y un 3% en calentar el suelo. En los ensayos no se incluyeron medidas de fotosíntesis. Los valores encontrados indican una situación de ambiente húmedo, sin limitaciones de agua en el suelo (**Jaramillo & Escobar**, 1984).

Según **Schubart & Salati** (1982), en ambientes húmedos donde el agua no limita la evapotranspiración, la mayoría de la radiación neta es usada para evaporar el agua. En las regiones desérticas con disponibilidad de agua limitada, la radiación se emplea en su mayor proporción en calentar el aire o el suelo. Los balances de energía realizados en la región amazónica en la estación cálida y húmeda indican que entre el 80 y 90% de la radiación solar se utiliza en el proceso de evapotranspiración.

La temperatura de la planta

Como una relación causal de los balances de radiación y de energía dentro del cultivo, se presentan diferencias de temperatura entre la planta y el aire circundante; éstas diferencias térmicas dentro de la plantación dependen en primer lugar de la cantidad de radiación incidente durante el día, de tal forma que las mayores diferencias ocurren en tiempo cálido y seco. En un día de alta nubosidad la temperatura de la planta y del aire tiende a igualarse. Otros factores que determinan estas diferencias dependen de la especie, de la morfología, fisiología y anatomía de la hoja, del grosor de la lámina foliar, de la tasa de transpiración e hidratación de la hoja.

Por ejemplo para *Coffea arabica* L., variedad caturra, las temperaturas en la superficie de la hoja observada hacia el amanecer y en las primeras horas del día son iguales o inferiores a la temperatura del aire en 1-2°C. Al aumentar la radiación solar, las hojas externas elevan su temperatura por encima a la del aire hasta en 10-12°C; las hojas sombreadas presentan temperaturas similares a las del aire próximo (Gómez & Jaramillo, 1974, Figura 2).

En el cafeto, las ramas siguen durante el día un comportamiento semejante al de las hojas pero se mantienen más calientes un mayor número de horas. Las ramas presentan temperaturas máximas más altas que las hojas y un

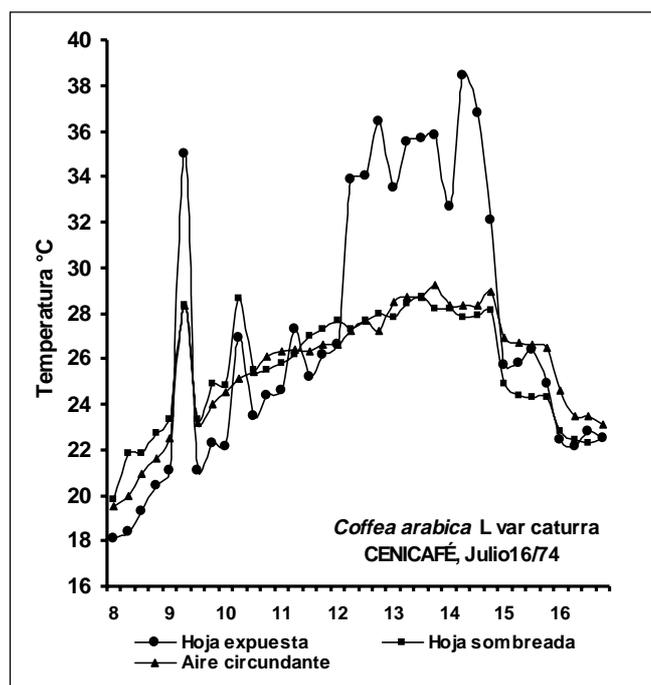


Figura 2. Temperatura de hojas de café *Coffea arabica* L. (Gómez & Jaramillo, 1974).

enfriamiento mas lento. Los frutos del cafeto siguen un comportamiento térmico similar al de las ramas.

El calentamiento y el enfriamiento de los diferentes órganos de la planta, aumentan o disminuyen la temperatura del aire adyacente; al comparar la temperatura del aire registrada dentro de un cafetal a libre exposición solar con la temperatura observada en la estación climática adyacente, se observa que en días de alto brillo solar se presentan diferencias hasta de 2°C. Durante la noche las diferencias están alrededor de 1°C. En días lluviosos o de alta nubosidad las diferencias son muy bajas o nulas (Jaramillo & Gómez, 1989).

Las diferencias entre la temperatura de la hoja y la del aire dependen de la especie de café y del contenido de humedad de la hoja, es así como en las de *Coffea canephora* con hojas de mayor tamaño y de mayor grosor las diferencias son mayores que en *Coffea arabica*, en la cual las hojas son relativamente más pequeñas y de menor grosor. Igualmente, al comparar plantas de las dos especies, las hojas de las plantas que no recibieron riego presentaron unas diferencias de temperatura mayores al compararlas con hojas de plantas que fueron regadas al suelo en forma continua (Figura 3) (Orozco & Jaramillo, 1978, Figura 3).

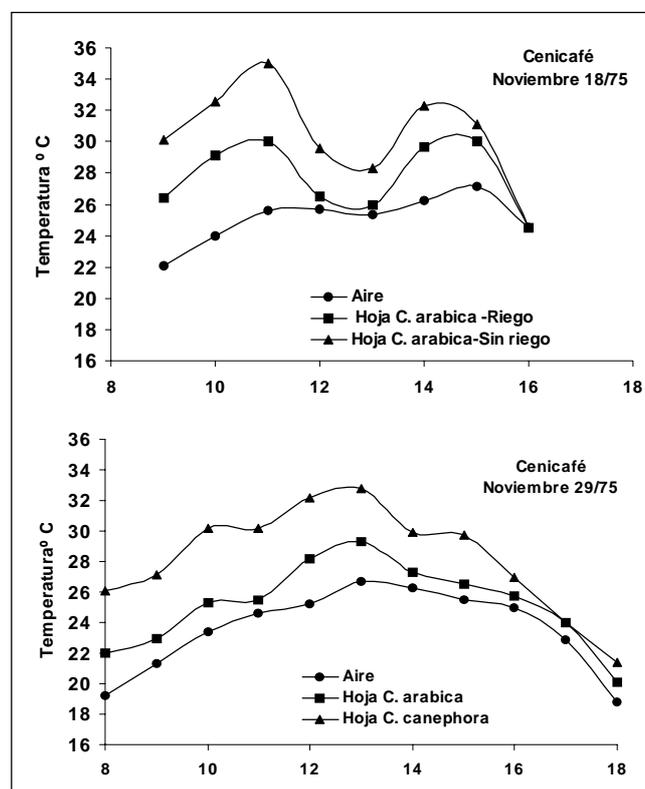


Figura 3. Temperatura de hojas de café *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (Orozco & Jaramillo, 1978).

Zahner (1968), atribuye estas diferencias a variaciones morfológicas, anatómicas y fisiológicas entre los tipos de hojas, tales como área foliar, grosor de la lámina, contenido de clorofila, cantidad de radiación recibida, tasas de transpiración y cantidad de agua en la hoja.

Las ramas del cafeto (*Coffea arabica* L.), siguen un comportamiento térmico semejante al de las hojas pero permanecen calientes más tiempo una vez disminuye la radiación solar; debido a una mayor masa las ramas presentan un enfriamiento más lento (**Gómez & Jaramillo**, 1974).

Las variaciones de la temperatura del aire en el interior de un cafetal bajo sombrero difieren con la altura sobre el nivel del suelo y las capas interiores permanecen más frías; las mayores diferencias se encuentran entre la superficie del suelo y un metro de altura; éstas diferencias son hasta de 4°C en las horas de mayor radiación. Entre 2 y 4 metros de altura las diferencias en temperatura son más pequeñas, con valores entre 1,0°C y 1,5°C (**Jaramillo**, 1976).

Balance hídrico

La parte aérea de la vegetación tiene la propiedad de actuar como barrera capaz de interceptar las precipitaciones, variando su efecto y distribución bajo el área de su cobertura. Una parte de la precipitación total en un ecosistema es retenida por las copas y tallos de los árboles (interceptación) y reintegrada a la atmósfera por evaporación. Del agua que alcanza la superficie del suelo ("Lluvia neta"), una fracción proviene del goteo de las hojas o pasa directamente a través de los espacios vacíos de la cobertura vegetal (precipitación directa); una pequeña cantidad de agua lluvia llega al suelo al escurrirse por la superficie de los tallos. De la lluvia neta, una parte se evapora directamente y otra proporción corre superficialmente por el suelo (escorrentía) y dentro del perfil del suelo parte es retenida como humedad de suelo y parte se mueve hacia capas más profundas (percolación). El agua también es absorbida por las raíces para salir posteriormente de la planta como vapor de agua a la atmósfera mediante el proceso de transpiración (**Hanchi & Rapp**, 1997).

Los resultados de balance hidrológico corresponden a mediciones diarias realizadas en las localidades de Cenicafé –Caldas (Latitud Norte: 05° 00' Longitud Oeste: 75° 36'. Altitud 1.310 m) Naranjal-Caldas (Latitud Norte: 04° 58' Longitud Oeste: 75° 39'. Altitud 1.381 m) y Paraguaicito –Quindío (Latitud Norte: 04° 24' Longitud Oeste: 75° 44'. Altitud 1203 m).

Variabilidad de la lluvia

Dentro de los agroecosistemas analizados se presenta una gran variabilidad de la lluvia debajo de los árboles de café; un valor promedio de 19.7% de las observaciones presentaron cantidades de lluvia superiores a la registrada en la parte externa de las parcelas; esta situación estaría indicando la proporción de la lluvia que es concentrada por la parte aérea del agroecosistema. Estos resultados se han encontrado en otros estudios realizados por **Raich** (1983), **Clarke** (1987) & **Bruijnzeel** (1990).

Evapotranspiración

En las condiciones climáticas de Cenicafé –Chinchiná– Colombia, **Suárez de Castro & Rodríguez** (1957), para observaciones diarias realizadas con lisímetros monolíticos, demuestran que la máxima evapotranspiración real se presenta cuando el suelo estaba cubierto con cobertura viva de añil rastrero (*Indigofera indica*), con un valor de 37% del volumen de la lluvia incidente; un valor del 20% se registró para un suelo sin cobertura y un menor valor del 11% se observó cuando el suelo tenía cobertura de hojarasca de guamo (*Inga* sp.). Las medidas anteriores demuestran que la mejor economía del agua en regiones secas o con períodos de deficiencia de agua acentuados se logra con un suelo con cobertura vegetal en descomposición, que puede lograrse cortando las arvenses al inicio del período seco.

Almacenamiento de agua en la parte aérea

La vegetación ejerce un efecto significativo sobre la cantidad de agua que llega al suelo, debido a la interceptación en el follaje de la lluvia incidente. El valor de almacenamiento es la cantidad de agua que permanece en la parte aérea del agroecosistema después de parar el goteo a la superficie del suelo. El almacenamiento de la lluvia por el agroecosistema está relacionado con las características morfológicas del cultivo y el índice de área foliar.

El almacenamiento de agua de la parte aérea para los agroecosistemas de cafetales analizados a partir de la lluvia diaria registró un valor medio de 0,83 mm/día con valores que varían entre 0,33 mm/día para un cafetal a libre exposición y 1,77 mm/día para un cafetal con guamo a 6m x 6m (Figura 4); estos valores dependen especialmente del porcentaje de cobertura vegetal; todos los valores observados están dentro de los medidos en otras condiciones y regiones del mundo con el uso del método de **Rutter** (1975), los cuales para los bosques tropicales están próximos a 1,7 mm/día (**Landsberg & Gower**, 1997).

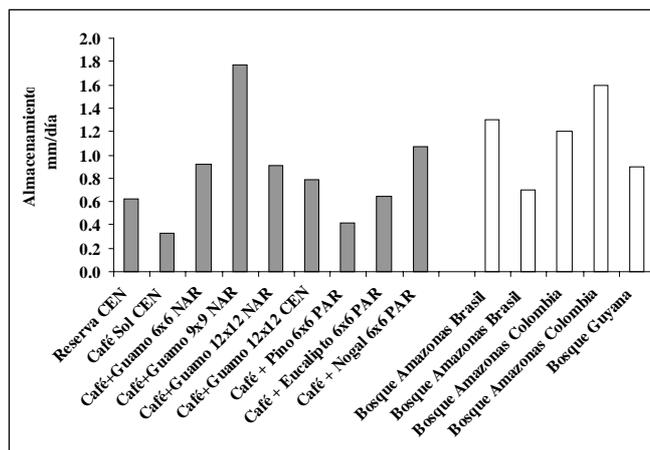


Figura 4. Almacenamiento de agua en la parte aérea en diferentes agroecosistemas de cafetales. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).

Interceptación

Para un bosque y para cafetales a libre exposición solar y bajos diferentes sombríos, la mayor proporción de la lluvia externa diaria que ingresa al sistema, es retenida por la parte aérea de la planta, con valores de interceptación del 56%; solamente un 44% de la lluvia llega a la superficie del suelo como lluvia neta, un 38% se infiltra en el perfil del suelo y un 6% es de escorrentía (Jaramillo, 2003). Los altos valores de la interceptación de la lluvia encontrados se explicarían por la alta densidad de siembra de los cafetos sumada al efecto de los árboles de sombrío. En el caso de los cafetales bajo sombra la interceptación se debe a la suma de la lluvia retenida por la sombra y de la captada por los cafetos. Los valores encontrados en este estudio están dentro de los rangos hallados por otros autores (Clarke, 1987, Bruijnzeel, 1990) en bosques húmedos para las condiciones tropicales de Brasil, Nigeria, Tailandia y Puerto Rico, en los cuales los valores de interceptación varían entre 3% y 63% respectivamente. Las variaciones anteriores reflejan diferentes condiciones climáticas, distintas intensidades de la lluvia y gran diversidad en la estructura del bosque.

Escurrimiento por los tallos

En relación con el escurrimiento de agua por los tallos, en Cenicafé se han realizado medidas en árboles de guamo (*Inga sp*) encontrándose una proporción muy baja del total de la lluvia externa; el valor máximo medio fue de 1,3%. Relaciones de esta magnitud en el flujo por el tallo concuerdan con los hallados en diversos estudios dentro de bosques (Raich, 1983; Lloyd & Marques, 1988; Hanchi & Rapp, 1997; Li et al., 1997; Tobón et al., 2000).

Lluvia neta

Dentro de los agroecosistemas de café las cantidades de lluvia neta diaria que ingresan al suelo, disponibles para el uso del cafeto, presentan proporciones más bajas, con un valor medio de 48% y valores extremos de 40% para cafetal con nogal y 59% para cafetal con guamo a 6m x 6m (Figura 5). La situación anterior es explicable por la presencia de dos niveles de interceptación de la lluvia, el primer estrato constituido por la copa de los árboles de sombrío y el segundo por un cafetal de alta densidad y con una cobertura continua. Las proporciones de lluvia neta registradas en la mayoría de las publicaciones presentan valores superiores al 80%, como es el caso de mediciones en la selva amazónica de Colombia y Brasil (Veneklaas, 1990, Mabblerley, 1992; Tobón et al., 2000).

Para regiones con condiciones de alta precipitación durante el año, estos sistemas no tendrían limitación en cuanto a la disponibilidad de agua para los cafetos; sin embargo, las densidades de siembra del sombrío y del cafeto deben ser tenidas en cuenta en aquellas regiones con períodos de deficiencia prolongados (3-4 meses) o con bajas cantidades de lluvia anual, debido a que el cafetal dispondría de una baja proporción de lluvia neta, especialmente durante los años de incidencia de El Niño, como lo relacionan Poveda & Jaramillo (2000), Poveda et al. (2001, 2002).

Escorrentía

La escorrentía es la cantidad de lluvia neta que se mueve sobre la superficie del suelo. La escorrentía se midió en predios con un área de captación de 12.0 m² delimitados

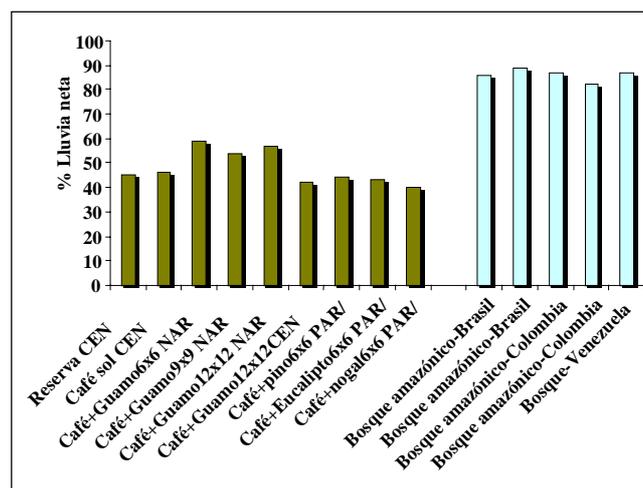


Figura 5. Proporción de lluvia neta diaria en los diferentes agroecosistemas de cafetal. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).

lateralmente por paredes de geomembrana y el agua recolectada se recogió en recipientes calibrados para el área de captación. Las medidas se realizaron diariamente.

Para los agroecosistemas analizados la escorrentía presentó un valor promedio de 9,4% con un valor máximo de 15,6% en el cafetal a libre exposición solar y un valor mínimo de 4,0% en el cafetal con sombrío de guamo a 12m x 12m y en la reserva de bosque de Cenicafé con un 5,6% (Figura 6). En los resultados anteriores se ve clara la influencia de la interceptación del follaje la cual disminuye la lluvia neta que ingresa al suelo; además los porcentajes de agua que ingresan al perfil del suelo son altos en los suelos donde se realizaron las mediciones.

Percolación

La percolación se refiere a la proporción de lluvia neta que ingresa al perfil del suelo y drena para suplir las aguas subterráneas. La percolación se estimó diariamente como la diferencia de la lluvia neta menos el agua de escorrentía.

Para diferentes unidades de suelos de origen volcánico en donde se realizaron las mediciones (Cenicafé, Naranjal- Chinchiná - Caldas y Paraguaicito- Buenavista-Quindío). Los suelos anteriores son de textura Franco-Franco-Limoso y Franco-arenosos, con buena aireación, buen drenaje, alto contenido de materia orgánica y alta capacidad de retención de humedad.

Las proporciones de la lluvia percolada se consideran altas, con un valor medio de 46,8% y valores extremos de 31,5% para cafetal a libre exposición en Paraguaicito-Quindío y 72,4% en un agroecosistema de café mas guamo a 12m x 12m.(Figura 7). Para los suelos de origen volcá-

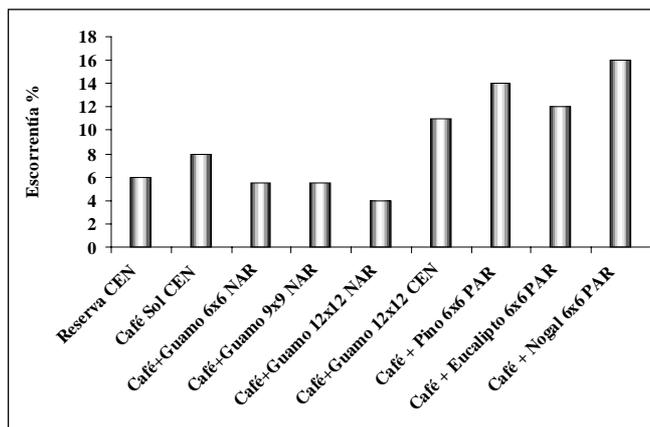


Figura 6. Proporción de escorrentía para diferentes agroecosistemas de cafetal. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).

nico este valor representa una alta proporción y debe tenerse en cuenta por su papel en el transporte de nutrientes hacia estratos más profundos.

Humedad del suelo

La cobertura vegetal, la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, y otros factores influyen en la dinámica del agua en el suelo.

Los registros de humedad volumétrica del suelo en cafetales a libre exposición solar y bajo sombríos se han realizado mediante técnicas de reflectometría (Time Domain Reflectometry, TDR). En los estudios de **Poveda & Jaramillo (2000)** y **Poveda et al. (2001)**, se demuestra que bajo una cobertura vegetal de café a la sombra, los cambios en la humedad del suelo debidos a la variabilidad de las condiciones climáticas, son menos drásticos que en un cafetal a libre exposición solar (Figura 8);

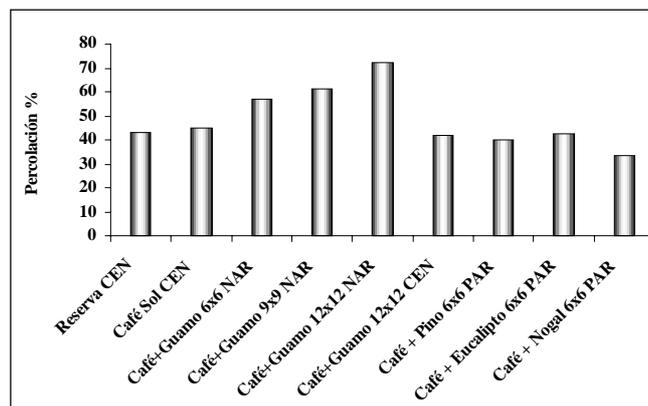


Figura 7. Proporción de percolación en diferentes agroecosistemas de cafetal. CEN (Cenicafé-Caldas). NAR (Naranjal-Caldas). PAR (Paraguaicito-Quindío).

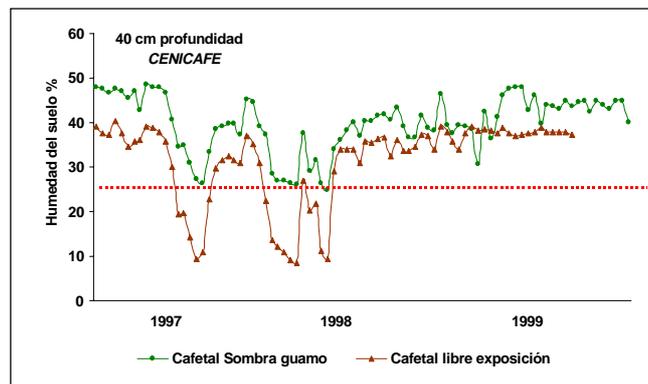


Figura 8. Variación decadal de la humedad volumétrica del suelo durante el ENSO 1997-1998. (Poveda & Jaramillo, 2000 y Poveda et al., 2001).

lo que trae consecuencias importantes con respecto a las condiciones de disponibilidad de agua que propicia la presencia del bioma circundante y de los flujos superficiales hacia la atmósfera. Las deficiencias de humedad en el suelo se acentúan con la ocurrencia del Fenómeno de El Niño (por ejemplo 1997-1998), período en el cual se disminuye la cantidad de lluvia en la región Andina de Colombia.

Transporte de los nutrientes en los componentes del balance hídrico

Los movimientos de los elementos químicos en los ecosistemas se pueden clasificar en tres tipos: *ciclos geoquímicos*, cuando los intercambios se realizan entre los ecosistemas; *ciclos biogeoquímicos* cuando se realizan dentro de los ecosistemas y *ciclos bioquímicos* cuando la redistribución de los elementos ocurre dentro de organismos individuales.

La salida de nutrientes de las plantas se presenta de varias maneras: 1- por lavado desde los diferentes órganos por la lluvia o el suelo. 2- por defoliación de los herbívoros, incluyendo la remoción física de la biomasa, la aceleración del lavado por daño del follaje. 3- por salidas asociadas a la reproducción y 4- por caída de hojas, ramas, corteza del tallo. 5- por tala y quema de la vegetación. Los ciclos de nutrientes en los bosques y en general las áreas con vegetación incluyen un conjunto complejo de mecanismos de retroalimentación directos entre el suelo y las plantas.

La dinámica de los nutrientes asociados con la redistribución de la lluvia se ha estudiado en diferentes ecosistemas de bosques y de cultivos (Edwards, 1982;

Imbach, *et al.*, 1989; Golley, 1991; Likens & Bormann, 1995; Cavalier, *et al.*, 1997; Li, *et al.*, 1997).

Las cantidades promedio de nutrientes en kg.ha⁻¹.año⁻¹, en el agua de lavado foliar en cafetales a libre exposición solar y bajo diferentes árboles de sombrío, provenientes de muestreos mensuales, se presentan en la Tabla 3. El pH se midió mediante el método potenciométrico y los elementos por espectrofotometría de absorción atómica.

El promedio de las cantidades de nutrientes que ingresan al suelo en el agua de lavado foliar en los ecosistemas analizados presentan los siguientes valores (kg.ha⁻¹.año⁻¹): potasio 85,4, calcio 41,1, magnesio 12,0, nitratos 21,9. El potasio es un elemento que incrementó su cantidad al pasar por la parte aérea en todos los ecosistemas analizados (anotados con +); las cantidades de potasio, calcio y magnesio son superiores a las observadas en las entradas de agua lluvia en los ecosistemas de bosque y en el cafetal con sombrío de nogal. Las cantidades de nutrientes en el agua de lavado foliar son comparables con las citadas por Veneklaas (1990) en bosques tropicales de Puerto Rico, Jamaica, Nueva Guinea, Venezuela, y en dos altitudes en Santa Rosa de Cabal-Risaralda-Colombia con los siguientes valores promedio (kg.ha⁻¹.año⁻¹): potasio 79,0, calcio 20,6 y magnesio 9,0. Los valores obtenidos durante las observaciones del estudio también son comparables con los hallados en estudios realizados en Costa Rica, Nueva Guinea y Venezuela (Eaton, *et al.*, 1973; De Las Salas & García, 2000; Tobón *et al.*, 2000). El agua de lavado foliar presentó un valor medio de pH de 6,6 para los ecosistemas en estudio; los valores más bajos en el pH se presentan para la asociación del café con el eucalipto y el pino, con un pH de 6,3 y 6,4 respectivamente.

Tabla 3. Cantidades promedio de nutrientes en kg.ha⁻¹.año⁻¹, en el agua de lavado foliar en cafetales a libre exposición solar y bajo diferentes árboles de sombrío.

Cobertura	Potasio	Calcio	Magnesio	Nitratos	pH
Café sol –CEN-	70,4 +	63,8 -	16,1 -	13,3 -	6,6 -
Café sol –PAR-	70,2 +	15,8 -	5,9 -	27,5 -	6,5 -
Café + guamo	120,0 +	71,4 -	15,4 -	14,7 -	6,8 +
Café + nogal	99,1 +	28,0 +	11,3 +	39,4 +	6,6 -
Café + pino	49,4 +	8,7 -	2,9 -	25,9 -	6,4 -
Café + eucalipto	49,4 +	14,1 -	5,2 -	14,3 -	6,3 -
Bosque	127,4 +	85,8 +	27,0 +	18,1 -	6,8 +
Media	85,4	41,1	12,0	21,9	6,6
Lluvia-PAR	9,9	27,9	8,6	36,0	6,7
Lluvia-CEN	13,3	75,0	19,5	32,5	6,7

(+) (-) Cantidad del nutriente, mayor o menor a la registrada en el agua lluvia que ingresa al agroecosistema. PAR, Paraguaicito-Quindío. CEN, Cenicafe-Caldas.

Tabla 4. Cantidades de nutrimentos en kg.ha⁻¹.año⁻¹, en el agua de escorrentía en cafetales a libre exposición solar y bajo diferentes árboles de sombrío.

Cobertura	Potasio	Calcio	Magnesio	Nitratos	pH
Café sol (CEN)	8,0	9,8	2,4	1,9	6,8
Café sol (PAR)	7,5	2,7	0,6	3,3	6,1
Café + guamo	15,1	13,0	2,6	4,0	6,7
Café + nogal	13,5	7,6	2,7	3,9	6,7
Café + pino	7,3	2,8	0,5	4,0	6,1
Café + eucalipto	8,1	2,3	0,5	2,2	6,1
Bosque	17,4	5,4	8,5	3,5	6,8
Media	11,0	6,2	2,5	3,3	6,6

Las cantidades de nutrimentos que se movilizan en el agua de escorrentía se presentan en la Tabla 4, en la cual se observan como valores promedio 11,0 kg.ha⁻¹.año⁻¹ para potasio, 6,2 para calcio, 2,5 para magnesio y 3,3 para nitratos, estas cantidades son inferiores a las registradas en el agua de lavado foliar, situación explicable por los menores volúmenes de escorrentía registrados en los ecosistemas en estudio.

Los resultados muestran que las cantidades de potasio aumentan en el agua de lavado foliar en todos los agroecosistemas estudiados cuando se comparan con las cantidades aportadas inicialmente por el agua lluvia, lo cual concuerda con lo expresado por **Golley** (1991), quien en diferentes estudios encontró que el potasio se presenta en concentraciones hasta 10 veces mayores que la registrada en el agua lluvia que ingresa al ecosistema. En el presente estudio el potasio presentó un valor medio máximo 9,6 veces superior al registrado en el agua lluvia. El potasio es un elemento importante en los procesos estomáticos de la planta y por lo tanto en el intercambio de vapor de agua y dióxido de carbono, el cual es exudado a la superficie de la hoja y lavado fácilmente por el agua lluvia. Para otros elementos como el calcio el aumento en el agua de lavado foliar en relación con la lluvia externa fue 1,5 veces mayor y para el magnesio 1,4 veces mayor.

En los resultados obtenidos se observan variaciones en las cantidades de los elementos químicos entre los diferentes sombríos, confirmando lo expresado por **Beer et al.** (1998) quienes manifiestan que muchos de los aspectos en el ciclo de los nutrientes son directamente afectados al escoger las especies de sombríos ya que las especies difieren significativamente en la composición de la biomasa.

Conclusiones

Los ecosistemas son influidos por los factores físicos, químicos y biológicos del medio ambiente; entre los factores físicos están la radiación solar que determina la cantidad de biomasa acumulada, la temperatura que condiciona la tasa de acumulación de ésta y la disponibilidad de agua necesaria para todos los procesos biológicos.

Los cafetales a libre exposición solar o con sombrío modifican en su interior los componentes de la radiación solar, del agua y de los nutrientes que ingresan externamente al agroecosistema, transformación que se puede determinar al analizar cada uno de los componentes de los balances de radiación, de energía, hidrológico y de nutrimentos. El conocimiento de la dinámica de los diferentes flujos, como el expuesto en el presente estudio, ayuda al entendimiento del clima al nivel de macroescala y contribuye a orientar el manejo de los cafetales buscando su sostenibilidad ambiental y su productividad, especialmente en regiones con limitaciones de radiación solar y de agua o cuando se presentan períodos críticos para el cultivo por deficiencia o exceso de agua durante eventos climáticos como El Niño y La Niña.

Para entender la magnitud de los cambios en el clima local y regional debidos a la intervención del hombre hay necesidad de profundizar en los estudios microclimáticos y mesoclimáticos de los ecosistemas de la región Andina Tropical con énfasis en las grandes variaciones que ocurren altitudinalmente dentro de las cuencas hidrográficas.

Bibliografía

Ayoade, J. O., 1983. Introduction to climatology for the tropics. Chichester, John Wiley and Sons. 258p.

- Ayra, S. P.**, 1988. Introduction to micrometeorology. Academy Press, Inc. San Diego, Ca. 307p.
- Barradas, V.L. & L. Fanjul**, 1986. Microclimate characterization of shade and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. Agricultural and Forest Meteorology **38**(1-3): 101-112.
- Beer J., Muschler, D., Kass D. & E. Somarrriba**, 1998. Shade management in coffee and cacao plantation. Agroforestry Systems **38**: 139-164.
- Bonilla, E.**, 1952a. Estudio comparativo de la distribución de la luz y el viento en dos regiones cafeteras (Caldas y Antioquia). Cenicafé **3**(25): 29-35.
- _____. 1952b. Estudio de la distribución vertical de la humedad relativa, de la temperatura del aire y del suelo, en una plantación de café. Boletín Informativo de Cenicafé **3**(34): 19-37.
- Bruijnzeel, L.A.**, 1990. Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion; a state of knowledge review. Amsterdam. Unesco International Hydrological Programme-Free University Amsterdam. 224p.
- Castillo, E., Arcila, J., Jaramillo, A. & J. Sanabria**, 1996. Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en *Coffea arabica* L. variedad Colombia. Cenicafé **47**(1): 5-15.
- _____, 1997. Interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y su relación con el área foliar de *Coffea arabica* L. Cenicafé **48**(3): 182-194.
- Cavalier, J., Jaramillo, M., Solis, D. & D. Leon de.**, 1997. Water balance and nutrient inputs in bulk precipitation in tropical montane cloud forest in Panama. Journal of Hidrology **193**(1-4): 83-96.
- Clarke, T.**, 1987. The interception process in tropical rain forest: A literature review critique. Acta Amazonica **16**-17: 225-238.
- De Las Salas & G., García, C.**, 2000. Balance hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la cuenca del río San Cristóbal, Bogotá. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Santa Fe de Bogotá. **XXIV**(91): 205-218.
- Eaton, J. S., Likens, G. E. & F. H. Bormann**, 1973. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. The Journal of Ecology **61**(2): 495-508.
- Edwards, P. J.**, 1982. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. V. Rates of cycling in throughfall and litter fall. Journal of Ecology **70**: 807-827.
- Escobar, E. & A. Jaramillo**, 1983. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L. Cenicafé **34**(3): 98-106.
- Giraldo, J. F. & A. Jaramillo**, 2004. Aspectos hidrológicos y de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrero de guamo (*Inga* sp) Cenicafé **55**(1): 52-78.
- Golley, F.B.**, 1991. Nutrient cycling and nutrient conservation. In: Tropical rain forest ecosystems; structure and function. Ecosystem of the world 14A. Elsevier Scientific Publishing Company. pp. 137-156.
- Gómez, L. & A. Jaramillo**, 1974. Temperatura de árboles de café al sol. Cenicafé **25**(2): 61-62.
- Hanchi, A. & M. Rapp.**, 1997. Stemflow determination in forest stands. Forest Ecology and Management, Amsterdam. **97**: 231-235.
- Imbach, A. C., Fassbender, H. W., Beer, J., Borel, R. & A. Bonnmann**, 1989. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* L.) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erithrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. VI. Balances hídricos e ingreso con lluvias y lixiviación de elementos nutritivos. Turrialba **39**(3): 400-414.
- Jaramillo, A.**, 1976. Condiciones micrometeorológicas en un cafetal bajo sombrero. Cenicafé **27**(4): 180-184.
- _____. 1986. Flujos de radiación solar y de energía en cafetales. Atmósfera **11**: 3-24.
- _____. 2003. La lluvia y el transporte de nutrimentos dentro de ecosistemas de bosque y cafetales. Cenicafé **54**(2): 134-144.
- _____ & **A. B. Chaves**, 1998. Interceptación de la lluvia en un bosque y en plantaciones de *Coffea arabica* L. Cenicafé **49**(2): 129-135.
- _____ & **A. B. Chaves**, 1999. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café- *Coffea arabica* L.- al sol y bajo sombra. Cenicafé **50**(2): 5-13.
- _____ & **J. M. Dos Santos**, 1980. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L. variedades catuaí y borbón amarillo. Cenicafé **31**: 86-104.
- _____ & **E. Escobar**, 1984. Balance de energía en *Coffea arabica* L. Cenicafé **34**(4): 115-126.
- _____ & **L. Gómez**, 1989. Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrero. Cenicafé **40**(3): 65-79.
- Jarvis, P. G., James, G. B. & J. J. Landsberg**, 1976. Coniferous forest. In: Montieth, J. L. (Editor). Vegetation and the atmosphere. London. Academy Press. Vol 2: 171-240.
- Kirkpatrick, T. W.** 1935. Studies on the ecology of coffee plantations in east Africa. I: The climate and eco-climate of coffee plantations. Amani (Tanganyka). East African Agricultural Research Station. 90p.
- Landsberg, J. J., Jarvis, P. G. & M. B. Slater**, 1973. The radiation regime of a spruce forest. In: Slayter, R. O. (Editor). Plant response to climate factors. Paris. UNESCO. pp. 411-418.
- _____ & **S. T. Gower**, 1997. Applications of physiological ecology to forest management. San Diego, Academy Press. 354 p.
- Li, Y.C., Alva, A. K., Calvert, D.V. & M. Zhang, M.**, 1997. Chemical composition of throughfall and stemflow from citrus canopies. Journal of Plant Nutrition **20**(10): 1351-1360.
- Likens, G. E. & F. H. Bormann**, 1995. Biogeochemistry of a forested ecosystem. Springer-Verlag. New York. 159p.
- Lloyd, C. R. & A. de O. Marques**, 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in amazonian rainforest. Agricultural and Forest Meteorology **42**(1): 63-73.
- Mabberley, D. J.**, 1992. Tropical rain forest ecology. Blackie Academy and professional. London. 300p.

- Montieth, J. L.**, 1969. Light interception and radiative exchange in crop stands. In: Eastin, J. D. et al (Editors). Physiological aspects in crop yield. Madison, USA. American Society of Agronomy. pp. 89-111.
- Orozco, F. J. & A. Jaramillo**, 1978. Efecto del déficit de humedad en el suelo sobre la temperatura del suelo y de las hojas en plantas de *Coffea canephora* y *C. arabica*. *Cenicafé* **29**(4): 121-134.
- Poveda, J. G. & R. A. Jaramillo**, 2000. ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia, *BAHC News(USA)* N° 8: 3-6.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N. & R. Mantilla**, 2001. Seasonality in ENSO – related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research* **37**(8): 2169-2178.
- _____, **Ramírez, J. M. & A. Jaramillo**, 2002. Un modelo estocástico para la humedad del suelo bajo diferentes coberturas vegetales en la región cafetera de Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos* 9: 47-56.
- Proctor J. T. A., Kyle W. J. & J. A. Davies**, 1972. The radiation balance of an apple tree. *Canadian Journal of Botany*. **50**(5): 1731-1740.
- Raich, J. W.**, 1983. Throughfall and stemflow in mature and year-old wet tropical forest. *Tropical Ecology* **24**(2): 234-243.
- Rosenberg, N. J.**, 1974. *Microclimate: The biological environment*. New York, McGraw-Hill Book. 315p.
- Rutter, A. J.**, 1975. The Hydrological cycle in vegetation and the atmosphere. Vol I. Principles. New York. Academy Press. pp. 11-154.
- Saeki, T.**, 1993. Light relations in plant communities. In: Evans L.(Editor). *Environmental control of plant growth*. New York, Academy Press. pp. 70-94.
- Schroeder, R.**, 1951a. Distribución de la temperatura en una plantación de café. *Cenicafé* **2**(23): 21-30.
- _____. 1951b. Resultados obtenidos de una investigación de microclima en un cafetal. *Cenicafé* **2**(18): 33-43.
- Schubart, H. O. R & E. Salati**, 1982. Natural resources for land use in the Amazonia region: The natural systems. In: Hecht, B. (Ed). *Amazonia, Agriculture and Land Research*. Cali-Colombia. CIAT. pp. 211-239.
- Sellers, W. D.**, 1974. *Physical climatology*. The University of Chicago Press. Chicago. 271p.
- Simbaqueva, O., Bastos, L. C. & M. G. Hurtado**, 1986. Estudio de la radiación solar en Colombia. Bogotá. HIMAT – IAN. 113 p.
- Stanhill, G., Hofstede, G. J. & J. D. Kalma**, 1966. Radiation balance of natural and agricultural vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society* **92**(391): 128-140.
- Suárez de Castro, F. & A. Rodríguez**, 1962. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Bogotá. 473 p.
- Tobón, C., Bouten, W. & J. Sevink**, 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology, Amsterdam* **237**: 40-57.
- Trojer, H.**, 1953. Distribución horizontal de luminosidad en un cafetal y en almácigos. *Cenicafé* **4**(45): 20-32.
- _____. 1955. Distribución y características de la precipitación en un cafetal bajo sombrío. *Cenicafé* **6**(67): 256-264.
- Veneklaas, E.**, 1990. Rainfall interception and aboveground nutrient fluxes in Colombian, montane tropical rain forest. Utrecht, University of Utrecht. 105p.
- Zahner, R.**, 1968. Water deficits and growth of trees. In: Kozlowski, T.T. (Editor). *Water deficits and plant growth*. New York. Academy Press. Vol. **2**: 191-254.

Recibido el 19 de noviembre de 2004.

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2005.

VARIACIÓN MORFOMÉTRICA EN POBLACIONES NATURALIZADAS Y DOMESTICADAS DE LA TILAPIA DEL NILO *OREOCHROMIS NILOTICUS* (TELEOSTEI: CICHLIDAE) EN EL NORTE DE COLOMBIA

por

Juan Carlos Narváez B.¹, Arturo Acero P.^{1,2} & Jacobo Blanco R.¹

Resumen

Narváez B., J.C., A. Acero & J. Blanco. Variación morfométrica en poblaciones naturalizadas y domesticadas de la tilapia del Nilo *Oreochromis niloticus* (Teleostei: Cichlidae) en el norte de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 383-394. 2005. ISSN 0370-3908.

Con el propósito de conocer la variación ecológica de la tilapia del Nilo *Oreochromis niloticus* en el norte de Colombia, se recolectaron 392 individuos en dos lagunas costeras, un embalse, dos ciénagas y tres centros piscícolas. El análisis discriminante canónico libre del efecto del tamaño (CDA-SF) de 21 medidas morfométricas entre 10 puntos anatómicos reveló discriminación entre las poblaciones naturalizadas y domesticadas. El CDA-SF también reveló variación morfométrica dentro de cada grupo. En las poblaciones naturalizadas se identificaron tres morfotipos, uno para cada categoría de sistema (dulceacuícola, estuarino y alcalino). Todos los resultados fueron atribuidos a las condiciones ambientales (salinidad, alcalinidad, temperatura y condiciones morfoedáficas), al tipo de alimento consumido por cada tipo de población en cada cuerpo de agua y al tipo de hábitat (silvestre y confinado).

Palabras clave: Caribe colombiano, especie exótica, morfometría, tilapia del Nilo, variación ecológica.

Abstract

In order to know the ecological variation of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in northern Colombia, 392 individuals were collected from two coastal lagoons, one dam, two marshes, and three fish farms. The canonical discriminant analysis size-free (CDA-SF) of 21 morphometric

¹ Programa de Valoración y Aprovechamiento de Recursos Marinos, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés", Santa Marta. Fax: 5(54)-4315761. A.A. 1016. Correo electrónico: (JCNB) jnarvaez@invemar.org.co; (JBR) jblanco@invemar.org.co

² Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Fax: 5(54)-4315761. A.A. 1016. Correo electrónico: aacero@invemar.org.co

measurements between 10 anatomical landmarks revealed discrimination among naturalized and domesticated populations. The CDA-SF also revealed morphometric variation within each group. Three ecomorphotypes were determined, each one for a type of system (freshwater, estuarine, alkaline). These results are attributed to environmental conditions (salinity, alkalinity, temperature, and morphoedaphic conditions) and kind of foodstuff consumed by every population in each water body, and kind of habitat (wild or confined).

Key words: Colombia Caribbean, exotic species, Nile tilapia, truss morphometric, ecological variation.

Introducción

Las tilapias del género *Oreochromis* son las más comunes en la acuicultura mundial. Se han introducido en muchos países subtropicales y tropicales para desarrollar la acuicultura dulceacuícola (FAO, 2001). Aunque han solucionado problemas nutricionales, las tilapias han pasado a ser casi un problema. Se liberaron accidental o intencionalmente al medio natural en muchos lugares y debido a sus capacidades biológicas (Trewavas, 1983), ecológicas (Balirwa, 1998) y genéticas (Fuerst *et al.*, 2000) se naturalizaron en la mayoría de los cuerpos de agua afectando principalmente las comunidades nativas de peces (Bhagat & Dwivedi, 1990; Ogutu-Ohwayo, 1990; Iongh & VanZon, 1993; McKaye *et al.*, 1995).

En Colombia, se ha descrito la presencia de *O. niloticus* en ciénagas de las cuencas de los ríos Cauca, Magdalena, San Jorge y Sinú, como también en algunos embalses (Alvarado & Gutiérrez, 2002), producto de un programa de poblamiento desarrollado por el INDERENA a finales de la década 1970-1980 (Popma & Phelps, 1979). Se cree que su colonización en los sistemas no autorizados fue de forma intencional y en algunos casos, de manera accidental, posiblemente por los descuidos en el manejo de los cultivos que se llevaron a cabo *in situ* o *ex situ* (Wedler, 1996; Gutiérrez, 2001). Desde entonces, la tilapia *O. niloticus* se estableció naturalmente y se convirtió en el sustento para muchas comunidades de pescadores (INPA, 1994; CEA, 1996; INPA-URRA, 2001; INVEMAR, 2002). Aunque lo anterior es benéfico socialmente, desde el punto de vista ambiental poco se conoce sobre el impacto que haya causado (Alvarado & Gutiérrez, 2002) y mucho menos sobre cuáles factores biológicos, ecológicos y genéticos han permitido su adaptación en esos cuerpos de agua.

En peces, cada especie puede tener un alto rango de variación morfológica que se sobrepone con características de otras especies; sin embargo, las divergencias frecuentemente son más grandes entre individuos de la misma especie que entre individuos de especies cercanas de la

misma comunidad (Hoogerhoud *et al.*, 1983; Albertson & Kocher, 2001). Esa diferenciación morfológica está correlacionada con diferentes características fisiológicas, ecológicas y etológicas (Fermon & Cibert, 1998; Chan, 2001; McKaye *et al.*, 2002; Trapani, 2003). Sin embargo, poco se conoce del efecto de los factores ambientales sobre esa diferenciación en poblaciones de especies (Meyer, 1990; Fermon & Cibert, 1998; Ponton & Méricoux, 2000). Para este propósito, los caracteres morfométricos han sido utilizados para cuantificar la variación ecológica e identificar y explicar procesos adaptativos de especies y poblaciones (Strauss, 1985; Thorpe, 1987; Meyer, 1990; Rohlf, 1990; Riffel & Schreiber, 1998; Albertson & Kocher, 2001; McKaye *et al.*, 2002; Trapani, 2003). En este estudio, se utilizó por primera vez una red de medidas morfométricas para cuantificar la variación entre y dentro de las poblaciones naturalizadas y domesticadas de *O. niloticus* en el norte de Colombia y determinar si los niveles de variación pueden ser explicados por el tipo y las condiciones ambientales del hábitat de cada población donde se ha establecido.

Materiales y Métodos:

Área de estudio

El área de investigación comprendió cinco ciénagas del norte de Colombia y tres centros piscícolas. La primera es la *Ciénaga Grande de Santa Marta* (10°50' -11°05' N, 74° 15' -74° 52' W), constituida por un conjunto de ciénagas interconectadas que interactúa con el mar Caribe y recibe agua dulce de los ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta y del río Magdalena, a través de los caños Clarín (Complejo de Salamanca Occidental), Aguas Negras (Complejo de Pajarales) y Renegado (Complejo de Santuario de Fauna y Flora) (Figura 1) (Botero & Salzwedel, 1999). La *Ciénaga del Totumo* (10° 42' N, 75° 09' W), anteriormente conectada con el mar, recibe aportes de las quebradas de la serranía de Piojó en época de lluvias, manteniendo la salinidad en cero. En época seca (enero-mayo, julio-septiembre), la salinidad puede incrementarse por evaporación hasta 15 UPS. La tempera-

tura varía entre 25 y 31°C, la alcalinidad no supera los 100 mg L⁻¹ y los valores de conductividad se encuentran alrededor de los 800 mS cm⁻¹ (CEA, 1996). El *Embalse del Guájaro* (10° 30' N, 75° 07' W) depende del Canal del Dique en época de creciente. En época de estiaje su profundidad disminuye (0.7 m) y la temperatura se incrementa (>34°C). Además, por sus suelos carbonatados, la alcalinidad se incrementa por encima de los 100 mg L⁻¹ y la conductividad supera los 1000 mS cm⁻¹ (CEA, 1996) convirtiéndolo en un ambiente de aguas alcalinas. La *Ciénaga de Cotocá* (9° 13' N, 75° 51' W) y la *Ciénaga Grande de Lorica* (9° 14' N, 75° 41' W) son tributadas por el río Sinú. Se caracterizan por ser de aguas dulces, con alcalinidades que no superan los 100 mg L⁻¹ y conductividades por debajo de 480 mS cm⁻¹. La temperatura en época de lluvia está alrededor de 23°C y en época seca se incrementa hasta los 42°C (URRA S.A. E.S.P., 1999). Los

centros piscícolas fueron: (i) el Centro de Investigación Piscícola de Repelón, Repelón, Atlántico; (ii) el Centro Piscícola del SENA Agropecuario, Santa Marta, Magdalena; (iii) la Granja piscícola “La Katia”, vereda Calabazo, Santa Marta, Magdalena.

Muestreos

Los muestreos se realizaron durante el año 2002 y principio de 2003. En los sitios naturales, se realizaron faenas de pesca diurnas con pescadores nativos de cada sitio de muestreo utilizando atarrayas y trasmallos con tamaños de malla que oscilaron entre 2 y 4". En general, se recolectaron al azar 320 individuos. Con respecto a los tres centros piscícolas, se recolectaron 72 individuos igualmente al azar. En la tabla 1, se describe el número de individuos recolectados por cada sitio de muestreo.

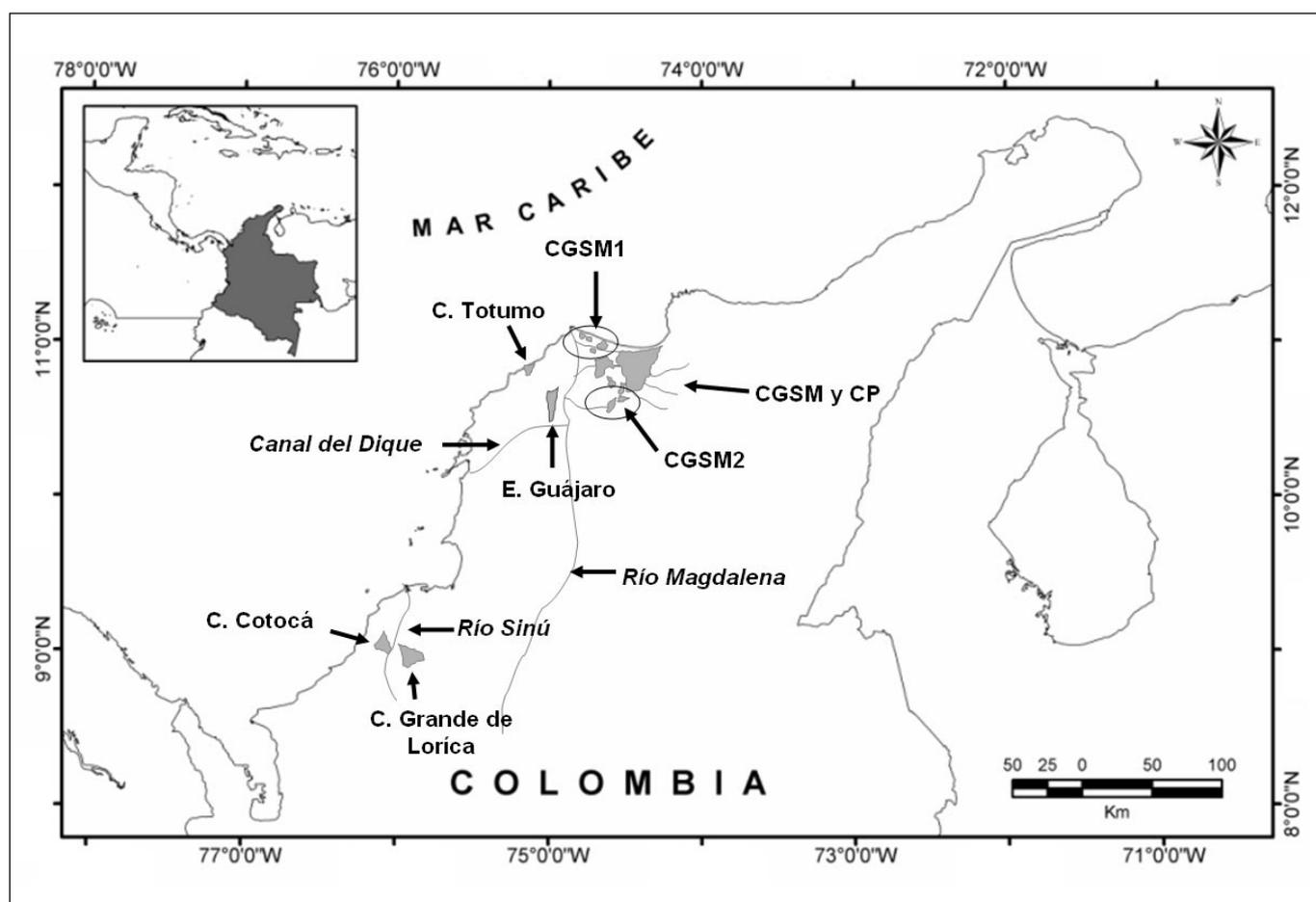


Figura 1. Área de estudio. Complejo de la Ciénaga Grande de Santa Marta y Pajarales (CGSM y CP) con sus respectivos sitios de muestreo: Complejo de Salamanca Occidental (CGSM1), y Complejo del Santuario Fauna y Flora (CGSM2); ciénaga del Totumo (C. Totumo); Embalse del Guájaro (E. Guájaro); y las del río Sinú: ciénagas de Cotocá (C. Cotocá) y Grande de Lorica (C. Grande de Lorica).

Tabla 1. Número de individuos recolectados en cada sitio de muestreo (n). El primer paréntesis describe la sigla del sitio y el siguiente, el departamento de cada sitio de muestreo.

Tipo de población	Tipo de Ambiente	Sitio de muestreo		n
Naturalizadas	Dulceacuícola	Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) (Magdalena)	Complejo de Salamanca Occidental (CGSM1)	50
			Complejo del Santuario Fauna y Flora (CGSM2)	52
		Ciénaga Grande de Lorica (CGL) (Córdoba)		59
		Ciénaga de Cotocá (CC) (Córdoba)		60
	Aguas duras	Embalse de Guájaro (EG) (Atlántico)	61	
	Estuarino	Ciénaga de Totumo (CT) (Atlántico)	38	
Domesticadas	Centro de Investigación Piscícola de Repelón (CPR) (Atlántico)		23	
	Centro Piscícola del SENA Agropecuario (CPS) (Magdalena)		31	
	Granja piscícola "La Katia" (GPLK) (Magdalena)		18	
Total				392

Trabajo en laboratorio

Se utilizó la técnica morfométrica propuesta por **Strauss & Bookstein**, (1982), "truss protocol". Esta consiste en un sistema de medidas de distancias verticales, horizontales y oblicuas entre puntos anatómicos preseleccionados, los cuales están identificados sobre la base de caracteres morfológicos escogidos para dividir el cuerpo en unidades funcionales. Se construyó una red de 21 medidas basada en 10 puntos anatómicos sobre el plano lateral izquierdo, siguiendo el protocolo de **Strauss & Bookstein** (1982). Los puntos de referencia son: (1) comisura de la boca (CB); (2) borde del premaxilar (BP); (3) base de la aleta pélvica (BAP); (4) base de la primera espina de la aleta dorsal (PEAD); (5) base de la primera espina de la aleta anal (BEAA); (6) base de la décima espina de la aleta dorsal (BDEAD); (7) base del radio de la aleta anal (BRAA); (8) base del último radio de la aleta dorsal (BURAD); (9) extremo inferior del pedúnculo caudal (EIPC); (10) extremo superior del pedúnculo caudal (ESPC). Las mediciones fueron realizadas con la ayuda de un calibrador digital con 0.01 mm de precisión. La figura 2 presenta en detalle el trazo de cada medida.

Análisis de los datos

Para el tratamiento de la información, cada grupo de individuos colectados por sitio de muestreo fue considerado *a priori* como un grupo discreto. Se realizó un análisis

de varianza a una vía (ANOVA) con cada una de las medidas morfométricas transformadas a logaritmo para determinar diferencias univariadas entre sitios de muestreos. Todos los individuos de *O. niloticus* muestreados tuvieron longitudes estándar (LS) entre 119.58 y 229.86 mm. Las diferencias de tamaño entre los sitios de muestreo fueron significativas (ANOVA: $F_{8,376}=19,43$, $p < 0.05$) (Tabla 3), siendo los individuos de CG los más grandes en promedio con 190.9 mm y los de CC los más pequeños con 158.1 mm. Dentro de los sitios de muestreo se presentó un amplio rango de tamaño de los individuos (Tabla 2). Esa variación

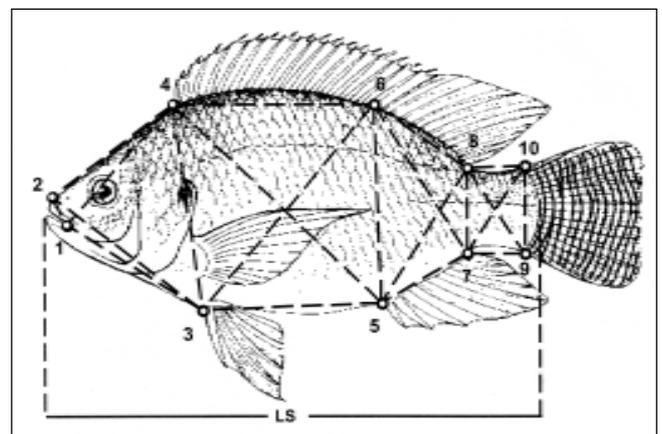


Figura 2. Puntos homólogos de referencia y la red de medidas propuestas para *O. niloticus*. LS = longitud estándar.

Tabla 2. Media (valor superior) y error estándar (valor inferior) de cada una de las observaciones originales de cada medida morfométrica en cada sitio de muestreo; en paréntesis se presenta el tamaño de la muestra. (**) Valores de *p* altamente significativos y (*) significativos.

Medidas morfométricas		Sitios de Muestreo									Global (392)	<i>F</i> _(8, 376)
		CC (n=60)	CGL (59)	CGSM1 (50)	CGSM2 (52)	CT (38)	EG (61)	CPR (23)	CPS (31)	GPLK (18)		
LS	Media	160,2	190,9	163,8	163,0	164,3	172,3	163,3	162,2	168,4	168,3	19,43**
	E.E.	1,4	2,7	2,3	1,2	2,3	1,8	4,6	2,6	2,2	0,9	
D 1-2		16,5	22,7	17,6	17,8	16,9	18,3	18,2	18,2	18,7	18,4	18,30**
		0,3	0,6	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,5	0,2	0,2	
D 1-3		54,3	68,8	55,2	53,0	53,2	57,5	51,1	49,7	52,7	56,2	7,92**
		0,7	1,2	0,6	0,8	0,8	0,5	1,7	1,0	1,0	0,4	
D 1-4		57,1	74,0	59,8	59,1	59,4	63,6	57,6	56,0	60,0	61,6	4,50**
		0,6	1,4	0,4	1,0	0,9	0,7	1,6	1,1	0,9	0,4	
D 2-3		69,5	88,2	71,4	68,6	69,0	74,4	65,7	65,8	69,8	72,7	8,94**
		0,8	1,6	0,7	1,1	1,1	0,8	2,2	1,1	1,2	0,5	
D 2-4		57,8	76,3	59,8	59,4	60,3	66,3	60,7	58,2	63,2	63,1	15,92**
		0,8	1,5	0,5	1,0	1,0	0,7	1,8	1,1	1,0	0,5	
D 3-4		71,8	92,1	72,5	72,1	70,9	78,6	67,8	65,5	66,9	75,0	21,02**
		0,7	1,6	0,7	1,1	1,2	1,0	2,5	1,2	1,1	0,6	
D 3-5		63,9	77,6	66,1	64,2	59,6	67,0	66,5	63,1	64,3	66,4	12,17**
		0,7	1,3	0,8	1,2	1,2	0,8	2,3	1,3	1,1	0,5	
D 3-6		79,4	100,5	81,9	80,6	77,4	85,9	74,9	71,1	72,0	82,6	21,76**
		0,8	1,7	0,8	1,4	1,3	1,1	3,0	1,5	1,2	0,6	
D 4-5		105,5	127,8 ²	108,3	104,5	105,3	113,1	97,2	95,7	99,8	108,4	34,04**
		0,9	2,1	1,0	1,7	1,7	1,4	3,6	1,9	1,7	0,7	
D 4-6		43,2	53,7	45,1	43,0	42,0	46,4	37,9	38,9	40,1	44,6	22,94**
		0,5	0,9	0,5	0,8	0,8	0,6	1,5	0,8	0,7	0,3	
Medidas morfométricas		Sitios de Muestreo									Global (392)	<i>F</i> _(8, 376)
		CC (n=60)	CGL (59)	CGSM1 (50)	CGSM2 (52)	CT (38)	EG (61)	CPR (23)	CPS (31)	GPLK (18)		
D 5-6	Media	81,6	103,0	84,8	81,9	80,5	88,0	73,8	72,1	74,7	84,6	36,78**
	E.E.	0,7	1,8	0,9	1,4	1,4	1,2	3,2	1,6	1,2	0,7	
D 5-7		34,0	42,8	34,7	35,1	36,1	36,6	32,3	32,1	34,0	35,9	6,24**
		0,5	0,8	0,5	0,6	0,8	0,7	1,5	0,8	0,8	0,3	
D 5-8		55,8	70,5	58,0	58,2	58,1	59,8	52,6	51,3	53,3	58,8	19,99**
		0,6	1,3	0,6	1,0	1,0	1,0	2,4	1,0	1,1	0,5	
D 6-7		82,9	103,5	82,9	82,8	84,3	87,5	76,4	76,7	79,8	85,8	12,95**
		0,9	2,0	0,8	1,3	1,4	1,2	3,2	1,6	1,4	0,6	
D 6-8		66,7	84,0	65,4	65,5	68,3	69,3	62,8	62,2	65,7	68,9	8,04**
		0,6	1,7	0,8	1,1	1,4	1,0	2,6	1,3	1,3	0,5	
D 7-8		28,9	36,4	30,3	30,6	30,5	31,1	27,0	26,8	28,5	30,6	13,68**
		0,3	0,7	0,3	0,5	0,6	0,6	1,1	0,5	0,6	0,2	
D 7-9		17,7	22,3	16,6	19,1	19,5	21,5	20,0	18,5	19,3	19,5	16,90**
		0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,7	0,6	0,7	0,2	
D 7-10		32,8	42,4	33,5	34,6	34,7	36,6	33,5	32,7	33,8	35,4	3,17*
		0,4	0,8	0,6	0,6	0,7	0,6	1,3	0,7	0,8	0,3	
D 8-9		30,7	40,1	31,4	32,2	33,4	33,6	31,2	31,3	33,8	33,3	7,58**
		0,4	0,8	0,3	0,6	0,6	0,7	1,1	0,6	0,8	0,3	
D 8-10		16,4	22,4	15,6	15,9	18,3	20,5	18,2	18,0	18,8	18,3	21,45**
		0,3	0,6	0,3	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5	0,5	0,2	
D 9-10		25,2	32,7	26,3	26,4	27,0	27,6	25,6	26,1	27,5	27,4	7,54**
		0,3	0,7	0,3	0,5	0,5	0,4	1,0	0,5	0,5	0,2	

fue causada por la recolección de individuos en diferentes estadios. A eso se le sumaron aspectos como el crecimiento indeterminado, típico en peces, y al dimorfismo sexual (Thorpe, 1987), típico en tilapias (Trewavas, 1983). Por lo tanto, para que la posible variación entre las muestras no resultara de un error de muestreo, se controló la fuente de variación en tamaño dentro de cada grupo discreto (dos Reis *et al.*, 1990). Para comprobar y eliminar el efecto del tamaño se tuvieron en cuenta los procedimientos presentados por Strauss (1985) y dos Reis *et al.* (1990). Lo primero, consistió en realizar un análisis de componentes principales con todos los datos transformados logarímicamente de la red de medidas de todos los sitios de muestreo (ACP total). Como se esperaba, el primer componente (CP-1) se interpretó como una medida multivariada del tamaño, ya que contribuyó en un 78% de la variación total y todas las medidas morfométricas fueron significativa y positivamente correlacionadas con este componente (Strauss, 1985). Por lo tanto, siguiendo los criterios de dos Reis *et al.* (1990), todas las medidas morfométricas fueron sometidas a regresión con el CP-1 y los residuos obtenidos de esas regresiones, que expresan la variación en la red de medidas libre del efecto del tamaño dentro de los sitios de muestreo, fueron utilizados para los análisis estadísticos posteriores.

Se usó el análisis discriminante paso a paso (AD step-wise) para analizar los patrones discriminantes y la variación morfométrica entre y dentro de cada sitio de muestreo. Este análisis permitió determinar cuáles variables caracterizaron cada grupo discriminado. El estadístico lambda de Wilk's se usó para evaluar si las funciones discriminantes canónicas contribuyeron significativamente en la discriminación de los grupos. La discriminación fue observada gráficamente, teniendo en cuenta las funciones canónicas variadas libre del efecto del tamaño (FCV-SF). Para validar la clasificación de los especímenes en cada grupo, basada en las funciones canónicas, se utilizó la prueba de clasificación "Jackknife". Para identificar patrones morfométricos se utilizó la Distancia de Mahalanobis entre los centroides de los grupos promedio. La matriz triangular resultante fue representada en un dendrograma, utilizando el promedio aritmético no ponderado como método de agrupamiento (UPGMA).

Resultados

En la tabla 2 se resume la media y error estándar de los datos originales por medida morfométrica y sitio de muestreo y el estimado global. Desde el punto de vista univariado, todos los datos morfométricos presentaron diferencias significativas entre sitios (ver valores de F en la tabla 2).

Variación entre las poblaciones naturalizadas y domesticadas

Las dos primeras funciones canónicas variadas libres del efecto del tamaño (FCV-SF) del análisis discriminante paso a paso (AD step-wise) representaron el 66.8% de la variación entre los sitios de muestreo, siendo la primera función el 45.8% de la variación y la segunda el 21%. La primera función canónica variada discriminó a los individuos domesticados de los naturalizados (Lambda de Wilks = 0.071, $p < 0.0001$), mientras que la segunda no discriminó ningún grupo (Figura 3a). Las funciones discriminantes seleccionaron 12 medidas para caracterizar a los grupos discriminados ($F = 12.36$, $p < 0.001$), cinco medidas de la cabeza (1-2, 1-3, 2-3, 2-4 y 3-4), cinco de la mitad del cuerpo (3-5, 4-5, 4-6, 5-6 y 6-8) y las dos que miden el largo del pedúnculo (7-9 y 8-10) (Figura 3b).

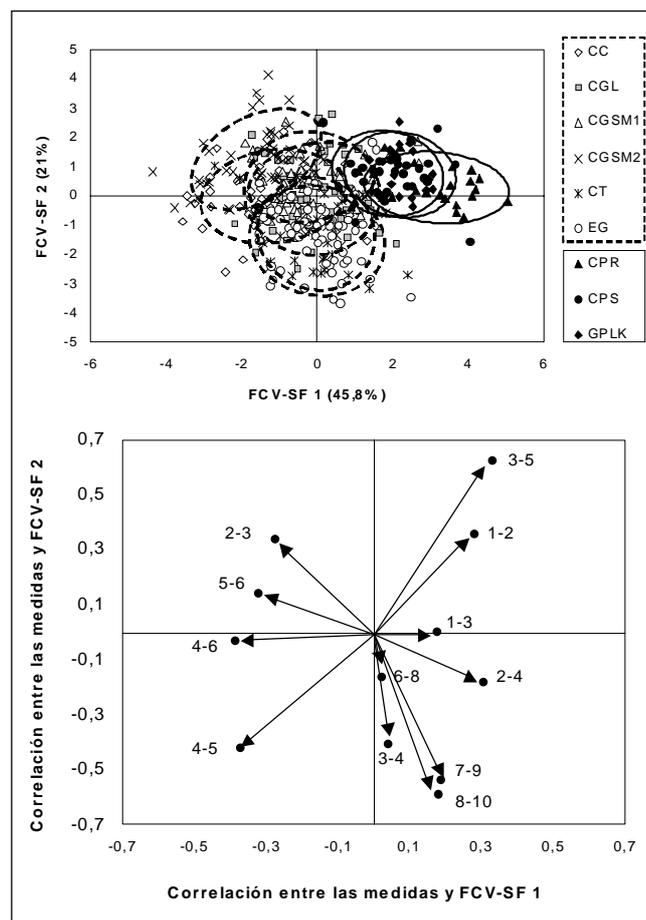


Figura 3. a. Gráfica bivariada con elipsoides al 95% de confianza de la proyección de los puntajes de los individuos de *O. niloticus* de los nueve sitios de muestreo (naturales y domésticos) sobre las dos primeras FCV-SF. **b.** Gráfica bivariada de la proyección de los puntajes estandarizados de las medidas morfométricas correlacionadas con las dos primeras FCV-SF.

Todos los individuos de *O. niloticus* examinados fueron clasificados correctamente en un 59% (Tabla 3). De los sitios naturales, los individuos que mejor se clasificaron fueron de CT, CGSM2, EG y CGSM1, con 74, 71, 67 y 64%, respectivamente. Mientras que los de CC y CGL presentaron los valores más bajos de clasificación, con 42 y 33%, respectivamente. Para los centros piscícolas, GPLK presentó el porcentaje más alto de clasificación con el 78% de los individuos clasificados, seguido por CPR con 61%. Mientras que CPS presentó el valor más bajo entre ellos, con el 55%.

En general, cuando se analizaron las Distancias de Mahalanobis entre los centroides del grupo de las tilapias domesticadas y los de las naturalizadas, se observó que son mayores que las distancias entre los centroides dentro de cada grupo discriminado. La mayor distancia entre centroides se registró entre: CGSM2 y cada centro piscícola; CC y cada centro piscícola; EG y cada centro piscícola; CT y cada centro piscícola; CGSM2 y CT; CGSM2 y EG. La menor distancia se presentó entre: cada centro piscícola (GPLK y CPR, GPLK y CPS, CPR y CPS); CGL y CC; CGSM1 y CGL. En la figura 4 se presenta el dendrograma de clasificación jerárquica de la matriz de disimilaridad calculada a partir de la Distancia de Mahalanobis. Se corrobora lo descrito por el análisis discriminante y se aprecia la clasificación de dos grupos, uno conformado por los sitios naturales y otro por los centros piscícolas.

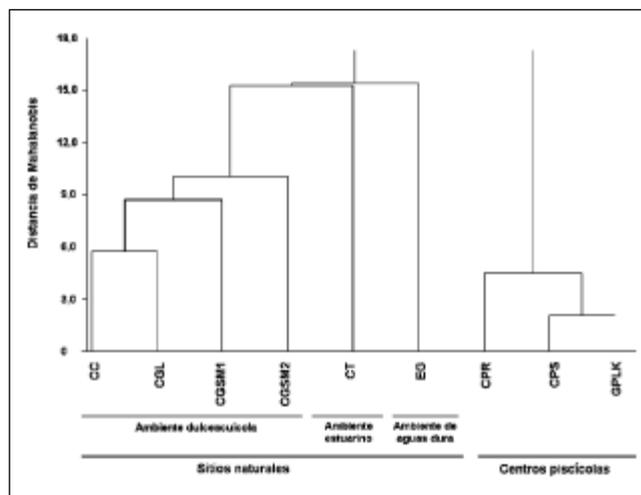


Figura 4. Dendrograma de clasificación jerárquica de sitios de muestreo calculado a partir de la Distancia de Mahalanobis entre los centroides obtenidos del análisis discriminante libre del efecto del tamaño. El método de agrupamiento fue el promedio aritmético no ponderado (UPGMA).

Variación entre y dentro de las poblaciones naturalizadas

Las dos primeras FCV-SF del AD paso a paso representaron el 73.4% de la variación entre los sitios naturales. La primera función aportó con el 44.3% de la variación y la segunda con el 29.1%. En la figura 5a, se presentan los

Tabla 3. Matriz de clasificación de los individuos de *O. niloticus* en cada sitio de muestreo basada en el análisis de Jackknife. Los porcentajes resaltados en negrita indican los valores más altos. Los números entre paréntesis presentan el tamaño de la muestra para cada sitio de muestreo.

Sitios de muestreo	Sitios predicho									% correcto de clasificación
	Naturales						Domesticados			
	CC	CGL	CGSM1	CGSM2	CT	EG	CPR	CPS	GPLK	
CC (n=60)	25	11	4	10	5	3		1	1	42
CGL (52)	6	17	2	4	1	15	1	6		33
CGSM1 (50)	1	3	32	6	2			2	4	64
CGSM2 (52)	6	2	7	37						71
CT (38)	4		2		28	2			2	74
EG (61)	1	4	6	1	6	41	1	1		67
CPR (23)		1	1			1	14	4	2	61
CPS (31)		3	2	1			3	17	5	55
GPLK (18)								4	14	78
Total (385)	43	41	56	59	42	62	19	35	28	58

puntajes de los individuos de cada sitio sobre las dos FCV-SF. Analizando la FCV-SF 1, se observa con mayor claridad la discriminación del sitio CGSM2 de EG y CT, aunque también, pero levemente CT y CGL de EG y CT (Lambda de Wilks = 0.175, $p < 0.0001$). Con respecto a la FCV-SF 2, se observa que muy levemente se discriminan los sitios CT y EG. Las funciones canónicas seleccionaron 10 variables que caracterizan a los grupos discriminados ($F = 12.68$, $p < 0.001$). Entre ellas están tres medidas de la cabeza (2-3, 2-4 y 3-4), cinco de la mitad del cuerpo (3-5, 4-5, 4-6, 5-6 y 6-8) y las dos que miden el largo del pedúnculo (7-8 y 8-10) (Figura 5b).

En general, los individuos de *O. niloticus* naturalizados se clasificaron correctamente en un 58% (Tabla 4). Los individuos mejor clasificados fueron de EG y CGSM2, con el 70 y 69% respectivamente. Los de CGL y CC fueron los peor clasificados, con el 31 y 43% respectivamente. En el dendrograma de la figura 4 se observa que la mayor distancia entre centroides resultó estar entre EG con CGSM2, CC, CGSM1 y CT. La menor distancia resultó estar entre CGL y CC, CGSM1 y CGSM2.

Variación entre y dentro de las poblaciones domesticadas

La primera FCV-SF contó con el 83% de la variación entre los sitios. En ella se observa que se discriminó el sitio CPR de GPLK con una sobreposición de los individuos de CPS entre ambos (Lambda de Wilks = 0.272, $p < 0.001$) (Figura 6a). Observando la segunda FCV-SF que contó con el restante de la variación, los sitios no se discriminaron. En este caso, las funciones discriminantes seleccionaron siete variables ($F = 9.77$, $p < 0.001$) que permitieron caracterizar a cada centro

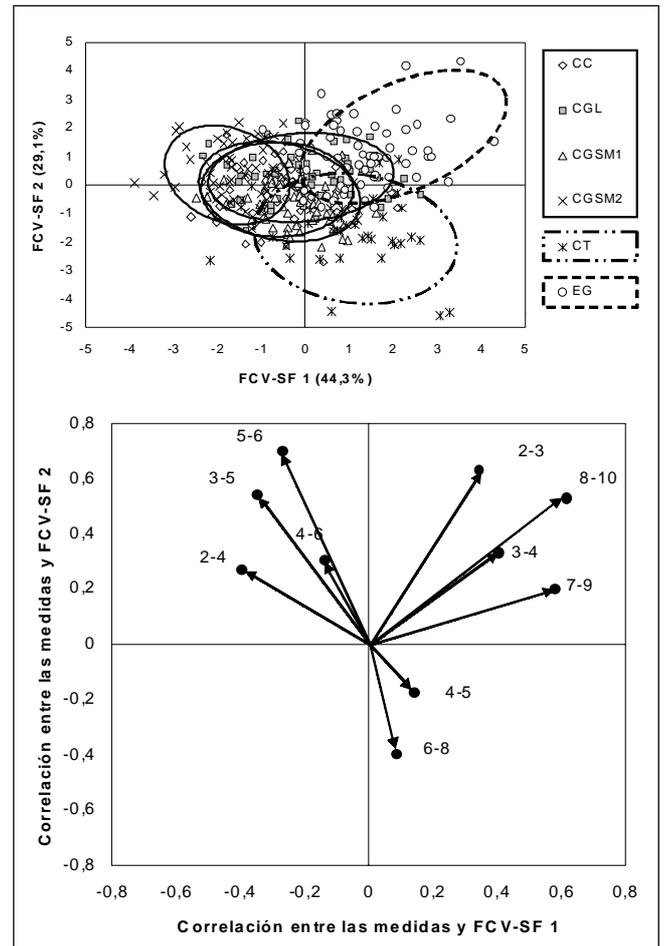


Figura 5. a. Gráfica bivariada con elipsoides al 95% de confianza de la proyección de los puntajes de los individuos de *O. niloticus* de los seis sitios naturales sobre las dos primeras FCV-SF. **b.** Gráfica bivariada de la proyección de los puntajes estandarizados de las medidas morfométricas correlacionadas con las dos primeras FCV-SF.

Tabla 4. Matriz de clasificación de los individuos de *O. niloticus* en cada sitio natural basada en el análisis de Jackknife. Los porcentajes resaltados en negrita indican los valores más altos. Los números entre paréntesis presentan el tamaño de la muestra para cada sitio de muestreo.

Sitios de muestreo	Sitios predicho						% correcto de clasificación
	CC	CGL	CGSM1	CGSM2	CT	EG	
CC (n=60)	26	13	4	11	4	2	43
CGL (52)	7	16	5	5	4	15	31
CGSM1 (52)	1	4	34	6	3	2	68
CGSM2 (50)	5	5	6	36			69
CT (38)	3	1	4		25	5	66
EG (61)	1	6	8	1	2	43	70
Total (313)	43	45	61	59	38	67	58

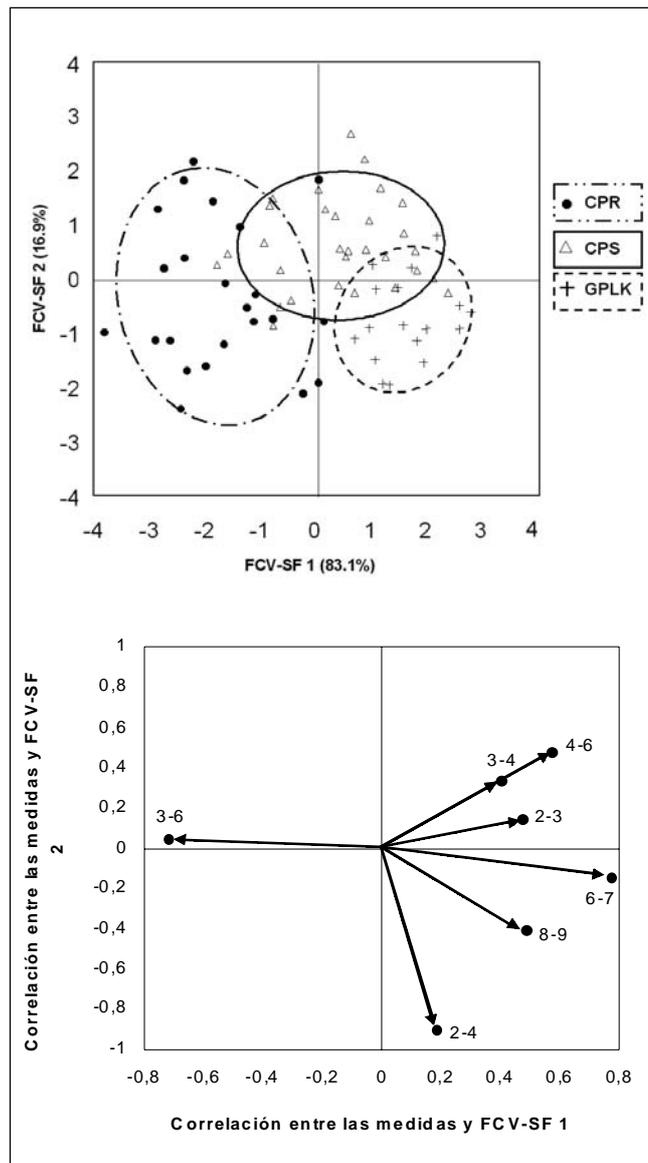


Figura 6. a. Gráfica bivariada con elipsoides al 95% de confianza de la proyección de los puntajes de los individuos de *O. niloticus* pertenecientes a los 3 centros piscícolas sobre las dos primeras FCV-SF. b. Gráfica bivariada de la proyección de los puntajes estandarizados de las medidas morfométricas correlacionadas con las dos primeras FCV-SF.

piscícola. Entre ellas están tres de la cabeza (2-3, 2-4 y 3-4), tres de la mitad del cuerpo (3-6, 4-6 y 6-7) y una de la parte posterior (8-9) (Figura 6b). Los individuos mejor clasificados fueron los de CPR y GPLK, con el 83% cada uno; mientras que los individuos de CPS se clasificaron correctamente en un 53%, distribuyéndose el resto de individuos mal clasificados entre los otros dos centros piscícolas.

Discusión

Variación entre poblaciones domesticadas y naturalizadas

A través del AD paso a paso, se encontró que los individuos domesticados y naturalizados de la introducida tilapia *O. niloticus* en el norte de Colombia se discriminan morfométricamente. Los individuos domesticados se caracterizaron por tener la cabeza más aguzada y el premaxilar más largo que los individuos naturalizados; mientras que estos últimos, se caracterizaron por tener la mitad del cuerpo más corta y baja, indicando ser menos robustos que los individuos domesticados.

Si la variación de la morfología de las poblaciones de peces, tanto confinadas como de vida silvestre, está explicada por la adaptación a su hábitat (Winemiller, 1991; Vreven *et al.*, 1998; Ponton & Mérigoux, 2000; Chan, 2001; Hjelm, 2001; Trapani, 2003), este trabajo sugiere que las diferencias en la forma del cuerpo de individuos naturalizados y domesticados de *O. niloticus* en el norte de Colombia pueden ser atribuidas a las mismas razones. Por ejemplo, el confinamiento de los individuos domesticados afecta su tasa de crecimiento (Vreven *et al.*, 1998) sin permitirles alargar el cuerpo. Por el contrario, los individuos naturalizados en su hábitat libre, por competir por alimento, huir de sus depredadores y buscar mejores condiciones, tienden a mejorar su tasa de crecimiento y presentar un mejor desempeño del cuerpo (Vreven *et al.*, 1998). Por su parte, las diferencias en la forma de la cabeza pueden ser atribuidas al tipo de alimento que consume cada individuo (naturalizado y domesticado); por ejemplo, el tamaño del premaxilar en los individuos domesticados puede ser explicado por el concentrado que consumen, ya que cuando están en estado juvenil éste se lo suministran entero; caso contrario de los naturalizados que consumen organismos planctónicos (Trewavas 1983; Balirwa, 1998) y el esfuerzo bucal para consumirlos es mínimo, ya que para ingerirlos solo necesitan filtrarlos y retenerlos en la cavidad bucofaringeal (Sanderson *et al.*, 1996).

En otros estudios con *O. niloticus* se han encontrado resultados similares. Velascos *et al.* (1996), Vreven *et al.* (1998) y Barriga-Sosa *et al.* (2004) analizaron datos morfométricos para cuantificar la variación entre y dentro de las poblaciones naturales y domesticadas de *O. niloticus* en África, Asia y América. Ellos informaron diferencias morfológicas entre las poblaciones naturales y domesticadas. Al igual como en este estudio, Vreven *et al.* (1998) y Barriga-Sosa *et al.* (2004) le atribuyeron esas diferencias a la forma de la cabeza, a la de la mitad

del cuerpo y a la longitud del pedúnculo. De otro lado, no se encontró una relación entre los sitios naturales y su respectiva cepa ancestral representada en los centros piscícolas estudiados, algo ya documentado en otros estudios (Velasco *et al.*, 1996).

Variación entre y dentro de las poblaciones naturalizadas

Cuando se analizaron únicamente los individuos de *O. niloticus* naturalizados, se encontraron diferencias morfométricas entre poblaciones de diferentes ambientes, distinguiéndose tres ecomorfotipos (Figura 4): (i) representado por los individuos de ambientes dulceacuícolas (CC, CGL, CGSM1 y CGSM2), los cuales se distinguen de los otros por presentar la mitad del cuerpo y el rostro más largo; (ii) por los individuos recolectados en un ambiente estuarino (CT), los cuales presentan el cuerpo más alto; (iii) y por los recolectados en un ambiente de aguas duras (EG), que se caracterizan por presentar el pedúnculo más largo y la cabeza más robusta. Aunque posiblemente la mayoría de estas poblaciones provienen de una misma fuente, la variación del ambiente sobre la diferenciación morfométrica es evidente. Un probable origen de esa variación pudo ocurrir durante el desarrollo ontogénico de los individuos o en su estado juvenil (Thorpe, 1987; Pepin & Carr, 1992; Ponton & Mérigoux, 2000) como respuesta a la adaptación en diferentes aspectos tróficos, biológicos o del hábitat (Meyer, 1990; Chan, 2001; McKaye *et al.*, 2002; Langerhans *et al.*, 2003; Trapani, 2003).

Poco se ha documentado sobre la morfometría de las poblaciones naturalizadas de *O. niloticus* para cuantificar su variación. Sin embargo, Barriga-Sosa *et al.* (2004) realizaron un estudio en México que les permitió concluir que la diferenciación entre poblaciones naturalizadas se debió principalmente a una influencia directa del ambiente, siendo la forma de la cabeza la principal variación.

Para aquellas poblaciones que originalmente habitan en su ambiente natural (Oeste y Norte de África) (Vreven *et al.*, 1998), las diferencias morfométricas fueron atribuidas a la variación del ambiente. Las poblaciones se diferenciaron en la longitud del pedúnculo y en la altura y ancho del hueso dentado faringeal, siendo esta estructura anatómica utilizada como una forma indirecta para evaluar la variación de los hábitos alimentarios de cada población y especie (Meyer, 1990; McKaye *et al.*, 2002; Trapani, 2003). En los integrantes de la familia Cichlidae, la forma de esta estructura se modifica cuando se han adaptado para consumir un tipo de alimento específico y en consecuencia, la forma de la cabeza resulta también modificada (Meyer, 1990; McKaye *et al.*, 2002; Trapani, 2003).

Variación entre y dentro de las poblaciones domesticadas

Se ha documentado que entre 1985 y 1995 se introdujeron en Colombia tres cepas de *O. niloticus*, cada una procedente de diferentes países (Alvarado & Gutiérrez, 2002). Desde el inicio, en el Norte de Colombia fueron criadas en CPR. Posteriormente, los centros CPS y GPLK adquirieron padrotes para fines experimentales y extensión acuícola. Aunque se desconoce de cuales de las tres cepas se obtuvieron padrotes, CPS obtuvo nuevos padrotes entre 1995 y 1996 de una cepa distinta para el mejoramiento de la ya existente. Mientras tanto, en 1997 el CPR sufrió problemas de sequías en los estanques y terminaron mezclando las tres cepas originales. Teniendo en cuenta lo anterior, las diferencias morfométricas determinadas aquí pueden ser atribuidas a: (i) posiblemente a la historia de vida de los individuos criados en cada centro piscícola. Cada uno representa la mezcla de tres cepas en el caso de CPS, de dos para CPS y la conservación de una en el caso de GPLK. (ii) probablemente al tipo de tratamiento que hayan recibido en cada centro, por ejemplo el tipo, cantidad y periodicidad del alimento artificial o a las condiciones del agua, como se ha documentado en otros trabajos (Eknath *et al.*, 1991); y (iii) al proceso de selección que se da en esos centros para el mejoramiento del desempeño en el crecimiento de los individuos (Eknath *et al.*, 1993).

En conclusión, este trabajo sugiere que los individuos de *O. niloticus* naturalizados en las ciénagas del norte de Colombia se han adaptado fácilmente a tres tipos de ambientes, permitiendo confirmar lo discutido por otros autores sobre la plasticidad fenotípica de los cíclidos para adaptarse a un nuevo hábitat (Meyer, 1990; Kaufman, 1992; Balirwa, 1998; Ponton & Mérigoux, 2000). Hasta ahora se puede afirmar que la causa principal de la variación morfométrica de *O. niloticus* en Colombia se debe principalmente a las condiciones ambientales de cada ciénaga y en los centros piscícolas, a lo discutido anteriormente. Faltan por concretarse estudios que involucren aspectos tróficos y genéticos de estas poblaciones para conocer que tanto influyen en esa variación.

Agradecimientos

Este trabajo hizo parte de la tesis de maestría en Biología Marina del primer autor, convenio Universidad Nacional de Colombia-INVEMAR, financiado por INVEMAR, programa de Valoración y Aprovechamiento de Recursos Marinos y por COLCIENCIAS, con una beca de "Joven Investigador". Los autores agradecen a las comu-

nidades de pescadores de las localidades mencionadas y a A. Arroyo y F. Quiñónez, CVS, por el apoyo en los muestreos en el río Sinú. Igualmente, a J. Vallecía y N. Rojas, CPR; R. Rosado y A. Daza, CPS; E. Wedler, GPLK, por los individuos domesticados.

Bibliografía

- Albertson, R.C. & Kocher T.D.**, 2001. Assessing morphological differences in an adaptive trait: a landmark-based morphometric approach. *J. Exp. Zoo.* **289**(6): 385-403.
- Balirwa, J.S.**, 1998. Lake Victoria wetlands and the ecology of the Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* Linné. A.A. Balkema Publishers. Rotterdam Netherlands. 260p.
- Barriga-Sosa, I.D.L.A., M.D.L. Jiménez-Badillo, A.L. Ibáñez & J.L. Arredondo-Figueroa**, 2004. Variability of tilapias (*Oreochromis* spp.) introduced in Mexico: morphometric, meristic and genetic characters. *J. Appl. Ichthyol.* **20**: 7-14.
- Bhagat, M.L. & S.N. Dwivedi**, 1990. Impact of the exotic fish, *Oreochromis mossambicus* on the indigenous fishery of Powai Lake, Bombay. *J. Ind. Fish. Assoc.* **18**: 511-515.
- Botero, L. & H. Salzwedel**, 1999. Rehabilitation of the Ciénaga Grande de Santa Marta, a mangrove-estuarine system in the Caribbean coast of Colombia. *Ocean. Coast. Manag.* **42**: 243-256.
- CEA**, 1996. Estudio limnológico y pesquero de las ciénagas del Totumo, Tocama, Luruaco, departamento del Atlántico. Gobernación del Atlántico – Centro de Estudios Ambientales (CEA), Universidad del Magdalena. Santa Marta. 111 p.
- Chan, M.D.**, 2001. Fish ecomorphology: predicting habitat preferences of stream fishes from their body shape. PhD Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 269 p.
- dos Reis, S.F., L.M. Pessoa & R.E. Strauss**, 1990. Application of size-free canonical discriminant analysis to studies of geographic differentiation. *Brazil J. Genet* **13**: 509-520.
- Eknath, A.E., J.M. Macaranas, L.Q. Agustin, R.R. Velasco, M.C.A. Ablan, M.J.R. Pante & R.S.V. Pullin**, 1991. Biochemical and Morphometric Approaches to Characterize Farmed Tilapias. *Naga* **5**: 7-9.
- _____. **M.M. Tayamen, M.S. Palada-de Vera, J.C. Danting & R.A. Reyes**, 1993. Genetic improvement of farmed tilapias: the growth performance of eight strains of *Oreochromis niloticus* tested in different farm environments. *Aquaculture* **111**: 171-188.
- FAO**, 2001. Yearbook, Fishery statistics, Aquaculture production. Vol 92/2. FAO, Rome.
- Fermon, Y. & C. Cibert**, 1998. Ecomorphological individual variation in a population of *Haplochromis nyererei* from the Tanzanian part of Lake Victoria. *J. Fish Biol.* **53**: 66-83.
- Fuerst, P.A., W.W. Mwanja & L. Kaufman**, 2000. The Genetic History of the Introduced Nile Tilapia of Lake Victoria (Uganda-E. Africa): The Population Structure of *Oreochromis niloticus* (Pisces: Cichlidae) Revealed by DNA Microsatellite Markers. In Abstracts and papers submitted to ISTA 5. Rio de Janeiro, Brazil (September 3-7, 2000).
- Gutiérrez, F.** 2001. La introducción de especies como un fenómeno global y las especies hidrobiológicas continentales introducidas y/o trasplantadas en Colombia. *Medio Ambiente* **14**: 3-32.
- Hjelm, J.**, 2001. What effects have habitat and food resources on perch morphology?. In: *Chinese Freshwater Fishes: Research Priorities in Fish Biology and Informatics at the Aquatic Frontier* (ed. Kullander, S.O.). Proceedings of an INCO-DEV Workshop convened Beijing, China, 7-11 December 2000. Brussels, ACP-EU Fish. Res. Rep. **9** : 63-76.
- Hoogerhoud, R.J.C., F. Witte & C.D.N. Barel**, 1983. Ecological diverentiation of two closely resembling haplochromine species of Lake Victoria (*H. iris* and *H. hiatus*; Pisces: Cichlidae). *Netherlands Journal of Zoology* **33**: 337-341.
- INPA**, 1994. Memoria del taller sobre aprovechamiento y ordenamiento pesquero y acuícola de embalses. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. Neiva, 43 p.
- INPA-URRA S.A. E.S.P.**, 2001. Monitoreo y estadística pesquera en la cuenca del Río Sinú con participación comunitaria. Informe Final, marzo de 2000 a febrero de 2001. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. Montería, 55 p.
- INVEMAR**, 2002. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta: un enfoque de manejo adaptativo. Informe final, INVEMAR – BID – MinAmbiente – CORPAMAG – UAESPNN. Santa Marta, 232 p + Anexos.
- Iongh, H.H. & J.C.J. VanZon**, 1993. Assessment of impact of the introduction of exotic fish species in north-east Thailand. *Aquaculture Fish. Man.* **24**(3): 279-289.
- Kaufman, L.**, 1992. Catastrophic change in species-rich freshwater ecosystems: The lessons of Lake Victoria. *BioScience* **42**(11): 846-858.
- Langerhans, R.B., C.A. Layman, A.K. Langerhans & T.J. Dewitt**, 2003. Habitat-associated morphological divergence in two Neotropical fish species. *Biological Journal of the Linnean Society* **80**(4): 689-698.
- McKaye, K.R., J.D. Ryan, J.R. Stauffer Jr., L.J. López, G.I. Vega & E.P. van den Berghe**, 1995. African tilapia in lake Nicaragua, ecosystem in transition. *BioScience* **45**(6): 406-411.
- _____. **J.R. Stauffer Jr., E.P. van den Berghe, R. Vivas, L.J. López Pérez, J.K. McCrary, R. Waid, A. Konings, W.J. Lee & T.D. Kocher**, 2002. Behavioral, morphological and genetic evidence of divergence of the Midas Cichlid species complex in two Nicaraguan Crater Lakes. *Cuadernos de Investigación de la U.C.A.* **12**: 19-47.
- Meyer, A.**, 1990. Ecological and evolutionary consequences of the trophic polymorphisms in *Cichlasoma citrinellum*. *Biological Journal Linnean Society* **39**: 279-299.
- Ogutu-Ohwayo, R.** 1990. The decline of the native fishes of lakes Victoria and Kyoga (East Africa) and the impact of introduced species, especially the Nile perch, *Lates niloticus*, and the Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Environ. Biol. Fish.* **27**: 81-96.

- Pepin, P. & S.M. Carr**, 1992. Morphological, meristic and genetic analysis of stock structure in juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) from the Newfoundland Shelf. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **50**: 1924-1955.
- Ponton D. & S. Mérigoux**, 2000. Comparative morphology and diet of young cichlids in the dammed Sinnamary river, French Guiana, South America. *J. Fish Biol.* **56**: 87-102.
- Popma, T. & R. Phelps**, 1979. Sustentación de la introducción de *Tilapia nilotica* en Colombia con fines experimentales. Informe Técnico. Inderena, Bogotá. 5 p.
- Riffel, M. & A. Schreiber**, 1998. Morphometric differentiation in populations of the Central European sculpin *Cottus gobio* L., a fish with deeply divergent genetic lineages. *Can. J. Zool.* **76**: 876-885.
- Rohlf, F.J.**, 1990. Morphometrics. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **21**: 299-316.
- Sanderson, S.L., M.C. Stebar, K.L. Ackermann, S.H. Jones, I.E. Batjakas & L. Kaufman**, 1996. Mucus entrapment of particles by a suspension-feeding tilapia (Pisces: Cichlidae). *J. Exp. Biol.* **199**: 1743-1756.
- Strauss, R.E. & F.L. Bookstein**, 1982. The truss: body form reconstruction in morphometrics. *Syst. Zool.* **31**:113-135.
- . 1985. Evolutionary allometry and variation in body form in the South American catfish genus *Corydoras* (Callichthyidae). *Syst. Zool.* **34**: 381-396.
- Thorpe, R.S.**, 1987. Geographic variation: a synthesis of cause, data, pattern and congruence in relation to subspecies, multivariate analysis and phylogenesis. *Boll. Zool.* **54**: 3-11.
- Trapani, J.** 2003. Morphological variability in *Cichlasoma minckleyi*, the Cuatro Ciénegas cichlid. *J. Fish Biol.* **62**: 276-298.
- Trewavas, E.**, 1983. Tilapiine fishes of the genera *Sarotherodon*, *Oreochromis* and *Danakilia*. Cornell. Ithaca, New York, 583 p.
- URRA S.A. E.S.P.**, 1999. Análisis limnológico actualizado del río Sinú y ciénagas anexas a partir de la zona de presa, durante la fase de operación. Informe Final, Montería. 131 p.
- Velasco, R.R., M.J.R. Pante, J.M. Macaranas, C.C. Janagap & A.E. Eknath**, 1996. Truss morphometric characterization of eight strains of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), p. 415-425. In R.S.V. Pullin, J. Lazard, M. Legendre, J.B. Amon Kothias y D. Pauly (eds.) The Third International Symposium on Tilapia in Aquaculture. ICLARM Conf. Proc. 41, 575 p.
- Vreven, E.J., B. Adèpo-Gourène, J.F. Agnèsè & G.G. Teugels**, 1998. Morphometric and allozyme in populations and cultured strains of the Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Teleostei, Cichlidae). *Belg. J. Zool.* **128**: 23-34.
- Wedler, E.**, 1996. El cultivo de la tilapia roja en lagunas costeras bajo condiciones de salinidad fluctuante: Experimentos de engorde intensivo en jaulas en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. En Curso y Seminario Internacional de Acuicultura (1: Mayo 8-31 de 1996: Santa Marta). Universidad del Magdalena, Santa Marta, pp. 21-30.
- Winemiller, K.O.**, 1991. Ecomorphological diversification in lowland freshwater fish assemblages from five biotic regions. *Ecological Monographs* **61**: 343-365.

Recibido el 22 de noviembre de 2004.

Aceptado para su publicación el 21 de junio de 2005.

SUPERREDES MAGNÉTICAS

por

Pedro Prieto*

Resumen

Prieto P.: Superredes magnéticas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 395-409. 2005. ISSN 0370-3908.

Una superred magnética o multicapa, consiste en un arreglo secuencial alternado de capas de un material magnético y uno no-magnético con espesores en la escala de los nanómetros, dentro del rango de longitud característica de la interacción magnética entre las capas de la superred. Estas heteroestructuras exhiben comportamientos nuevos e interesantes en sus propiedades eléctricas, magnéticas y de transporte. El descubrimiento de la magnetorresistencia gigante (GMR) en ellas abrió una amplia gama de aplicaciones; la más importante ha sido como sensor de campo magnético para ser usado como cabeza de lectura en discos duros y en memorias magnéticas no volátiles (MRAM). Otro fenómeno, conocido como *Exchange Bias*, o polarización de intercambio, aparece cuando entran en contacto dos materiales uno ferromagnético y otro antiferromagnético. Las interacciones de sus momentos magnéticos en la superficie límite o interfaz cuando la muestra es enfriada bajo la acción de un campo magnético a temperaturas por debajo de la temperatura de Niel del material antiferromagnético hace que el ciclo de histéresis no sea simétrico y se desplace a lo largo del eje del campo la magnitud H_E . Un sistema ideal para estudiar este fenómeno de corrimiento de intercambio es la manganita $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ (LCMO), el cual dependiendo del dopaje de Ca exhibe fases ferro y antiferromagnética.

Palabras clave: Materiales magnéticos, superredes magnéticas, magnetorresistencia, interfaces ferro-antiferro, polarización de intercambio.

Abstract

Magnetic superlattices, also known as multilayers, are alternating thin layers of magnetic and nonmagnetic materials constructed with thicknesses on the order of magnitude of the characteristic length-range of the magnetic interactions between the layers in the superlattices. They have interesting properties with respect to resistance and magnetization. The discovery of giant magnetoresistance (GMR) effect in this magnetic superlattice allowed the developments of GMR sensors for reading heads of hard discs and non volatile magnetic memories (MRAM). Exchange Bias effect occurs when two materials, one ferromagnetic and another antiferromagnetic are in atomic contact after

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

the system is cooled below the respective Neel and Curie temperatures in an external cooling field. Its characteristic signature is the shift of the center of the hysteretic loop from its normal position to H_E . The $\text{La}_x\text{Ca}_{1-x}\text{MnO}_3$ (LCMO) manganite is an ideal system to study exchange bias effect, because depending of the Ca content the system exhibit ferro and antiferromagnetic behavior.

Key words: Magnetic materials, Magnetic superlattices, Ferro-antiferro interfaces, Magnetoresistance, Exchange bias.

1. Introducción

En el contexto de la física del estado sólido, el término “*electrónica*” comprende todos los efectos sobre el transporte electrónico que dependen de la carga del electrón. Los circuitos y dispositivos electrónicos generalmente se basan en el hecho de que los electrones poseen una carga eléctrica lo cual implica que se puede controlar el flujo de electrones, es decir la corriente eléctrica, por medio de campos eléctricos. El espín es otra propiedad del electrón, fundamental en el entendimiento de las propiedades magnéticas de los materiales, v. gr. incrementa el magnetismo en un material sólido. El flujo de electrones puede ser entonces controlado por medio de campos magnéticos externos. El término “*espintrónica*” o “*magnetoeléctrica*” comprende todos los fenómenos relacionados con la influencia del spín electrónico sobre los fenómenos de transporte en sólidos. En materiales ferromagnéticos (FM) el movimiento de un electrón depende fuertemente de la orientación del espín con respecto a la magnetización local. Es importante hacer notar aquí que en todos estos procesos de dispersión el principio de conservación del espín se cumple. La longitud de escala característica para la conservación del espín, es decir, su longitud de difusión, varía en el rango de algunos nanómetros a cientos de nanómetros (en Permalloy algunos nanómetros; en Co y algunas aleaciones magnéticas hasta unas decenas de nanómetros, mientras en metales no ferrosos como el Cu excede los 100 nanómetros). Cuando las dimensiones físicas del sistema son comparables con estas longitudes características, es decir, en el rango nanométrico, aparecen efectos magnéticos que no se dan en el material en bloque. La figura 1 muestra escalas de longitud de diferentes fenómenos físicos y las técnicas instrumentales relevantes para superredes metálicas¹. Las longitudes características, las cuales son diferentes dependiendo de la dirección de medida, juegan un papel fundamental en las propiedades magneto electrónicas de multicapas o superredes formadas por la deposición alternada de dos materiales con características magnéticas diferentes¹.

Muchas de las propiedades magnéticas de los materiales son modificadas cuando ellos crecen en forma de

película delgada o multicapa. Por ejemplo, la temperatura de Curie (T_C) decrece con el espesor; en una monocapa de Fe (110) depositada sobre tungsteno el T_C es de 225 K y de 282 K para la misma película cubierta con una capa de Ag. Una monocapa de Fe (100) no se ordena magnéticamente, lo cual es debido a que en una monocapa de este tipo, los próximos vecinos, correspondientes a la estructura en bloque (los átomos en el centro de la estructura bcc) no están presentes; si se adiciona los próximos vecinos con una bicapa de Fe (100) se tiene un T_C de 220 K cercano al valor de 225 K para la capa (110) donde los próximos vecinos aparecen en la monocapa^{2,3}.

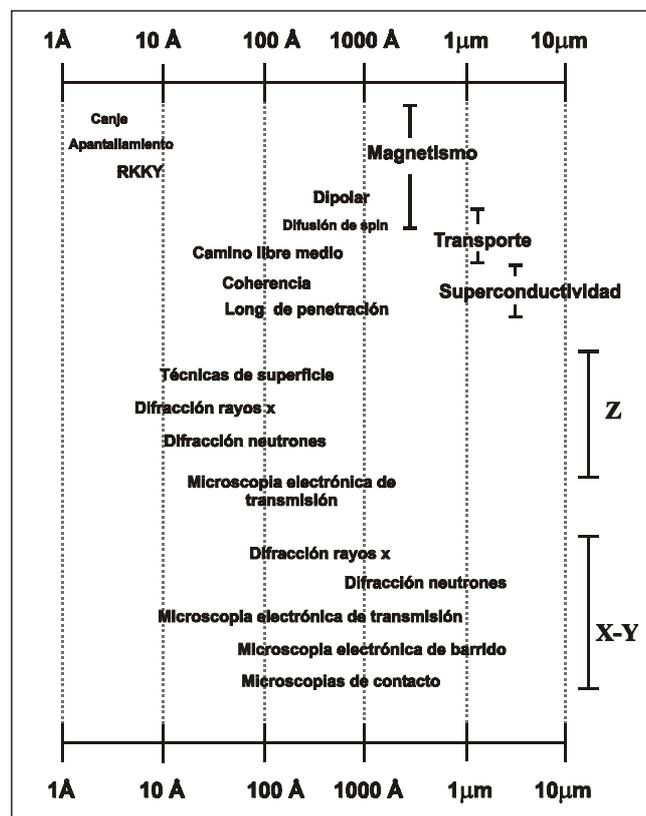


Figura 1. Escala de longitudes de fenómenos físicos y técnicas instrumentales relevantes para superredes metálicas. Nótese que la longitud característica es diferente dependiendo de la dirección de medida. Tomado de referencia 4.

El comportamiento de la magnetización de saturación (M_s), ó el momento magnético por átomo, a bajas temperaturas cambia en capas ultra-delgadas dependiendo de la capa de material no magnético adjunto. Por ejemplo se observa un incremento del momento del Fe de $2.2 \mu_B$ ($\mu_B = e\hbar/2m_e = 9.2740154 \times 10^{-24} \text{ J/T}$, el magnetón de Bohr) para el material en bloque a $2.5\mu_B$ para una monocapa de Fe en contacto con una capa de Au⁵.

El comportamiento crítico cerca de la temperatura de Curie es de gran relevancia para las propiedades de películas magnéticas ultra-delgadas. El comportamiento crítico esta relacionado con el modelo usado para describir la estructura magnética y las interacciones responsables del orden magnético. La pregunta clave es a qué espesor se pasa de un comportamiento tridimensional 3D a un comportamiento bidimensional 2D. Justo por debajo de T_C cuando se inicia el ordenamiento magnético la magnetización M esta dada por:

$$M(T) \propto (1 - T/T_C)^{-\beta} \quad (1)$$

β es el llamado exponente crítico y su valor depende del modelo 2D ó 3D utilizado y puede ser determinado experimentalmente por medio de mediciones cuidadosas de $M(T)$ cerca a T_C . Para películas delgadas de Ni se ha encontrado que la transición de 3D a 2D ocurre en espesores correspondientes a 6 monocapas (6 ML)⁶, los valores correspondiente de T_C son alrededor de 450 K correspondiente a un 70% del valor de 630 K en bloque. Para Fe y Co los puntos de Curie son 1042 y 1388 K respectivamente por lo que los valores de T_C en la región de transición 2D a 3D serían del orden de 700 K pero problemas de interdifusión entre la película y el sustrato cambian en la práctica este valor esperado. Los anteriores son ejemplos de fenómenos nuevos que aparecen en películas delgadas y multicapas de materiales magnéticos como se ilustra esquemáticamente en la figura 2. Adicionalmente, hay un efecto en el comportamiento magnético de una capa ó multicapa debido a la calidad de la superficie límite entre sustrato y película, o entre capas de diferente material^{7,8}. Llamamos en este trabajo interfaces a estas superficies límites.

El descubrimiento del efecto de magnetorresistencia gigante (GMR por sus siglas en inglés Giant Magneto-Resistance)⁹ simultáneamente, con el comportamiento oscilatorio de la interacción de intercambio en estructuras magnéticas consistentes de capas metálicas magnéticas separadas por capas metálicas no magnéticas¹⁰ dieron inicio a un intenso trabajo tanto experimental como teórico en el desarrollo de otros sistemas de multicapas magnéticas con avances significativos en los últimos 10 años.

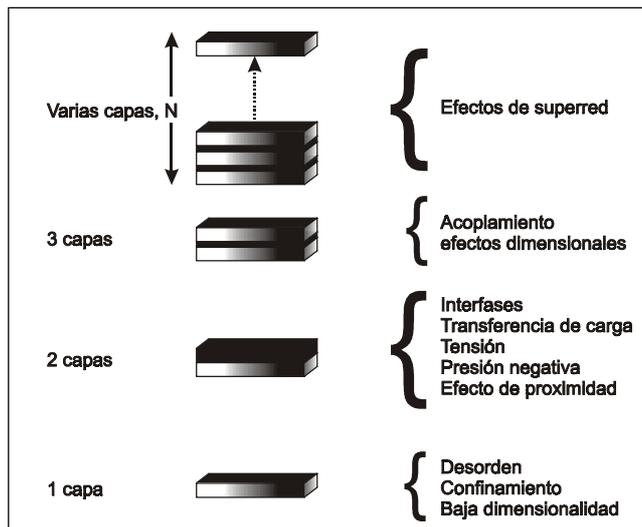


Figura 2. Posibles efectos en superredes dependiendo el número de capas. Adaptada de J. Santamaría y coautores.⁷

Este trabajo se concentra en presentar y discutir los efectos de magnetorresistencia gigante (GMR) que aparece en multicapas de materiales magnéticos y no magnéticos, específicamente en superredes de Fe/Cr, recalando la influencia de la rugosidad interfacial sobre la GMR; y en el efecto de intercambio por polarización (*Exchange Bias*) en multicapas ferro/antiferro de óxidos magnéticos, específicamente superredes ferro-antiferro de manganitas de $\text{La}_x\text{Ca}_{1-x}\text{MnO}_3$, resultados obtenidos dentro del desarrollo de proyectos de investigación por miembros (profesores y estudiantes) del Grupo de Investigación que dirijo.

2. Origen de la Magnetorresistencia Gigante GMR

La magnetorresistencia (MR) es el cambio en la resistencia eléctrica de un material conductor cuando éste se encuentra en presencia de un campo magnético externo. En materiales conductores no magnéticos, como por ejemplo en metales como Au, Cu, la magnetorresistencia es debida a la fuerza de Lorentz que un campo magnético ejerce sobre los electrones de conducción; es un efecto relativamente pequeño. En conductores magnéticos, Fe por ejemplo, la polarización de espín de los electrones genera una contribución a la magnetorresistencia¹². Las propiedades de transporte de los metales de transición puede ser expresada como la suma de dos contribuciones de los electrones de conducción con espín hacia arriba (\uparrow) y espín hacia abajo (\downarrow). La dependencia de la resistencia con el ángulo entre la magnetización y la corriente eléctrica es fuente de magnetorresistencia, se conocen con el nombre de magnetorresistencia anisótropa (AMR, por

sus siglas en inglés anisotropic magnetoresistance). El desorden de espín a escala atómica incrementa la resistividad de materiales ferromagnéticos. En el caso de multicapas magnéticas la resistencia puede disminuir a menos de la mitad de su valor original cuando se aplica un campo magnético. Este efecto es conocido con el nombre de magnetorresistencia gigante, GMR, fue descubierto en 1988⁹ en superredes de Fe/Cr. El efecto GMR se presenta en una gran variedad de superredes o nanoestructuras de otros materiales. La observación original de GMR hecha en “sándwich” cristalinos de superredes de Fe/Cr con orientación (100) crecidas por epitaxia de haces moleculares MBE. Se encontró que en campo magnético aplicado cero la magnetización de capas de Fe se alinea antiferromagnéticamente para ciertos espesores de la capa de Cr; cuando se aplica un campo magnético los momentos magnéticos de las capas se alinean paralelamente unos a otros, como se esquematiza en la figura 3. Este ordenamiento da como resultado que la resistencia de estas estructuras sea fuertemente dependiente del campo magnético aplicado siendo más alta cuando las capas ferromagnéticas de Fe se alinean antiparalelamente. La MR de tales estructuras es mucho mayor que la MR intrínseca de las capas de Fe y se incrementa con la disminución de la temperatura.

Estos resultados parecieron inicialmente algo “esotéricos” pero poco después se observó este efecto en superredes policristalinas de Fe/Cr, las cuales pueden ser crecidas de una manera más simple por pulverización catódica. Experimentos posteriores comprobaron que la

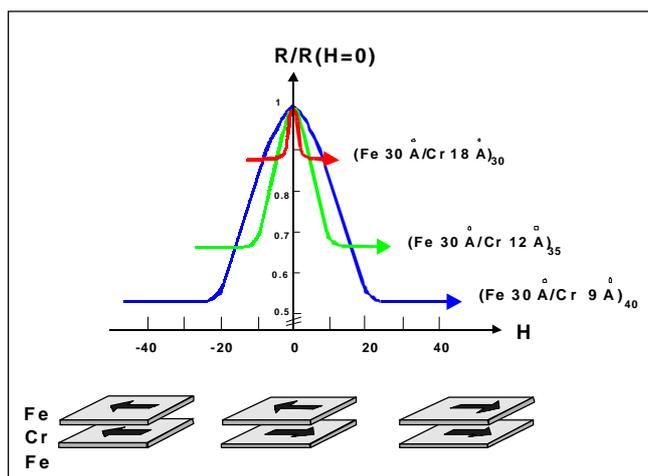


Figura 3. Efecto de magnetorresistencia gigante en superredes de Fe/Cr, Baibich,⁹ para tres espesores de Cr diferentes, manteniendo constante el espesor de la capa de Fe. El esquema inferior muestra las direcciones de magnetización de las capas en campo $H=0$ (acople antiferromagnético) y en campo de saturación (alineación paralela).

GMR podía ser observada en una amplia variedad de multicapas magnéticas de metales de transición. Adicionalmente, la magnitud GMR oscila con el aumento del espesor de la capa no-magnética;¹³ esto depende de que la magnetización de las capas ferromagnéticas se alinee paralela (acople ferromagnético) o antiparalelamente (acople antiferromagnético). Esta oscilación es causada por una oscilación en el signo de la interacción de intercambio (*Exchange Coupling*) entre las capas ferromagnéticas. El periodo de oscilación fue encontrado a ser justamente unas cuantas capas atómicas, típicamente alrededor de 1 nm, pero pudiendo variar hasta ~ 2 nm.

Esta interacción de intercambio entre capas, ó *Exchange Coupling* es una propiedad general de casi todos las superredes de metales magnéticos de transición *3d*, *4d*, or *5d* ó metales nobles. Únicamente las multicapas que interactúan antiferromagnéticamente muestran un efecto notorio de GMR, y es solo en estos sistemas en los que la orientación relativa de los momentos magnéticos de las capas vecinas es significativamente alterada por la aplicación de un campo magnético.

Cualitativamente se puede explicar la reducción de la resistencia en estas superredes magnéticas de acuerdo con el esquema de la figura 4. En los metales de transición las propiedades de transporte pueden ser expresadas como

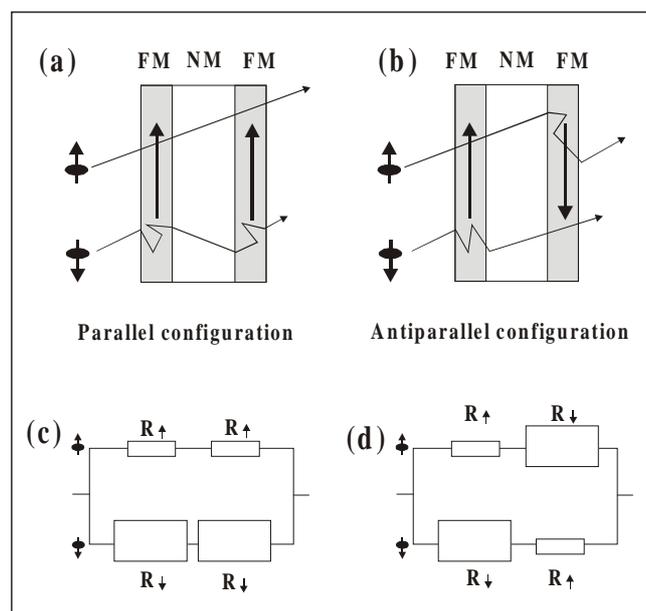


Figura 4. Esquema de una superred magnética. FM y NM representan las capas ferromagnética y no magnética respectivamente. (a) Configuración de magnetización paralela, bajo acción de un campo externo. (b) Configuración antiparalela, en campo cero. (c) y (d) muestra circuitos de resistencias a las configuraciones (a) y (b) respectivamente¹⁶.

las suma de dos contribuciones de los electrones de conducción con espín hacia arriba y espín hacia abajo. La GMR es una consecuencia de la no-equivalencia de esos dos canales de espín y el cambio en el estado de magnetización de la superred cuando se aplica el campo magnético¹⁵.

El modelo basado en dispersión dependiente de espín es el pilar para el entendimiento de la GMR. La figura-4 presenta un esquema de una superred compuesta de un material no magnético (NM) entre dos capas de material ferromagnético (FM); (a) representa la situación cuando existe un campo magnético externo, el cual obliga a que la magnetización de las dos capas FM se orienten paralelas entre sí y en la dirección del campo externo; (b) corresponde a la situación cuando no hay campo externo y la magnetización de las capas FM corresponde a la configuración antiparalela.

La dispersión dependiente de espín, presente en todo material ferromagnético, significa que electrones con espín opuesto a la magnetización son dispersados más efectivamente que aquellos con espín paralelo^{17, 12}, tal como se esquematiza en la figura 4 (c) y (d). La magnetización paralela y antiparalela en la superred muestra que cada capa magnética se comporta como una válvula selectiva de espín. Su dirección de magnetización determina cuál tipo de electrones, espín hacia arriba o hacia abajo, deja pasar predominantemente. La resistividad de un ferromagneto se expresa como:

$$\rho = \frac{\rho_{\uparrow}\rho_{\downarrow}}{\rho_{\uparrow} + \rho_{\downarrow}} \quad (2)$$

donde ρ_{\uparrow} y ρ_{\downarrow} son las resistividades para los electrones con espín hacia arriba y espín hacia abajo, respectivamente.

En superredes magnéticas, cuando la magnetización de las capas FM corresponde a la configuración paralela, figura 4 (a), esto es, cuando la superred está bajo la acción de un campo magnético externo, la resistencia de canal espín hacia arriba R_{\uparrow} es más pequeña que la resistencia para el canal espín hacia abajo R_{\downarrow} , figura 4 (c); la resistencia neta R_p llamada resistencia en configuración paralelo, está dada por:

$$R_p = \frac{2R_{\uparrow}R_{\downarrow}}{R_{\uparrow} + R_{\downarrow}} \quad (3)$$

Para el alineamiento antiparalelo, figura 4 (b), en campo cero, la magnetización alternada de las capas ferromagnéticas conlleva a una alta dispersión de los elec-

trones en ambos canales de espín, figura 4 (d), y la resistencia en configuración antiparalelo R_{AP} está dada por:

$$R_{AP} = (R_{\uparrow} + R_{\downarrow})/4 \quad (4)$$

Expresando la magnetorresistencia (MR) como:

$$MR = \frac{R_{AP} - R_p}{R_p} = \frac{(R_{\downarrow} - R_{\uparrow})^2}{4R_{\downarrow}R_{\uparrow}} \quad (5)$$

3. Física de la Magnetorresistencia Gigante

Para explicar la GMR se han propuesto varios modelos teóricos, en general basados en la dispersión dependiente de espín¹⁸, y/o en la dependencia de la estructura de bandas con la configuración magnética¹⁹. De manera simple podemos asumir que los electrones ven dos potenciales en una superred: un potencial intrínseco que revela la periodicidad de la superred, y otro extrínseco que revela los defectos que actúan como fuentes aleatorias de dispersión a los electrones de conducción.

El potencial intrínseco para la configuración paralela tiene un período igual al período químico; para la antiparalela es el doble del período químico. Este puede ser representado por un potencial de Kronig-Penny, en el cual la altura de la barrera es diferente para los dos canales de espín hacia arriba y hacia abajo; y en la configuración AP se alternan escalones altos y bajos, como se muestra en el esquema de la figura 5. Los potenciales de dispersión son potenciales extrínsecos aleatorios asociados con defectos (impurezas, defectos estructurales, rugosidad entre capas) y se puede representar por estacas.¹⁹

En una primera aproximación, una contribución al potencial dispersor en la superficie límite entre capas (la interfaz) debido a la rugosidad se puede considerar como alguna modulación del escalón. Los potenciales de dispersión en la interfaz son dependientes de espín ya que el escalón en la interfaz está entre el límite de un metal magnético y uno no magnético. Los potenciales de dispersión debidos a impurezas y defectos en la región dentro de la capa (intracapa) son también dependientes de espín como en el material en bloque. Desde un punto de vista microscópico tanto el potencial intrínseco de la multicapa (escalón de potencial) como los extrínsecos debidos a defectos en la interfaz e intracapa son fuente de magnetorresistencia gigante. Introducir una distribución de defectos real que pueda predecir la proporción de las dos contribuciones no es una tarea fácil. Sin embargo, es posible extraer información de las dos contribuciones de medidas experimentales de GMR en muestras en las cuales se controle sistemáticamente la

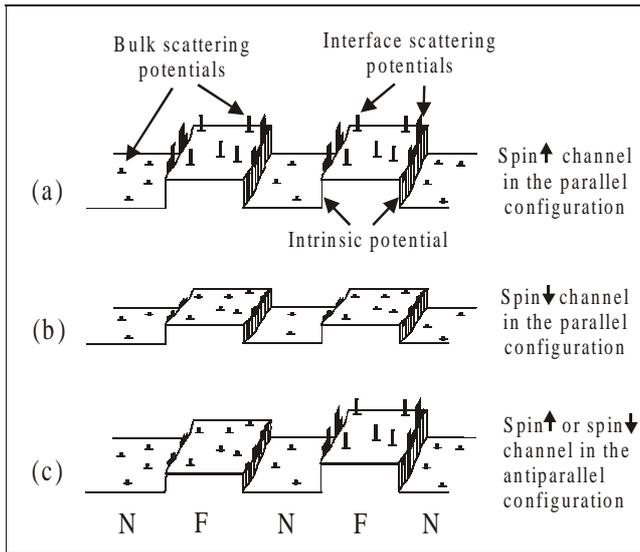


Figura 5. Esquema de las barreras de potencial para los electrones de conducción con espín hacia arriba y hacia abajo. F es la capa ferromagnética, N es la capa normal. (a) y (b) esquematizan la configuración paralela y (c) la antiparalela. Las estacas representan potenciales de dispersión aleatoria¹⁶.

concentración de defectos o impurezas. Pero siempre es difícil separar cuál es debido a cambios en la interfaz y cuál es debido a cambios en el grado de ordenamiento antiparalelo o a fluctuaciones de espín en la interfaz.

Las mediciones de magnetotransporte se pueden realizar en dos geometrías diferentes. La primera en la cual la dirección de circulación de la corriente aplicada está en el plano de la película, conocida como la geometría CIP (por sus siglas en inglés Current In the Plane). La segunda en la cual la dirección de circulación de la corriente es perpendicular al plano de la película, geometría CPP (de sus siglas en inglés Current Perpendicular to the Plane). Mediciones en geometría CPP no son fáciles de realizar debido a los valores bajos de resistencia de la superred; pero esta medición tiene la ventaja sobre la CIP de que permite hacer la deconvolución de las dispersiones de los electrones que ocurre en la intracapa de la que ocurre en las interfaces²².

4. Efecto de Polarización de Intercambio

Un efecto de interacción de intercambio entre momentos magnéticos adicional al *Exchange Coupling*, discutido anteriormente, es el llamado efecto de interacción por polarización de intercambio mejor conocido como "*Exchange Bias*"²³, observado por primera vez en partí-

culas Co, material ferromagnético (FM) cubiertas con óxido de Co, material antiferromagnético (AFM)²⁴. También ha sido observado en bicapas de película delgada de un material ferro y otro antiferromagnético²⁵. La característica particular (huella digital) de este efecto es el corrimiento del centro del ciclo de histéresis magnética de su posición normal $H = 0$ a $H = H_E$.

Este efecto tiene aplicación importante en la válvula de espín²⁶, multicapa que consta de una tricapa de dos materiales ferromagnéticos separados por una capa espaciadora no magnética, crecida sobre una capa antiferromagnética, como se ilustra en el esquema de la figura 6. La interacción por polarización de intercambio en la interfaz AFM-FM ancla la magnetización de la capa ferro a una dirección específica. La capa ferromagnética superior se magnetiza libremente en campos pequeños mientras que en la curva de histéresis de la capa ferromagnética anclada es desplazada la magnitud H_E hacia campos positivos (en este caso, pero se puede desplazar hacia campos negativos) a lo largo del eje magnético por la interacción de polarización de intercambio (*exchange bias*), gráfico superior de la figura 6. El ciclo ancho de histéresis está determinado por el campo coercitivo (H_C) de la capa ferro anclada, pero a su vez está siendo afectado por la anisotropía de intercambio.

El resultado mostrado en la figura 6 es para una capa ferromagnética libre de permalloy; su campo coercitivo es tan pequeño que no es detectable cuando la capa no anclada de permalloy conmuta a campo cero. La gráfica inferior de la figura 6 muestra la curva de MR es esta estructura. Se puede usar la densidad de energía superficial para describir la magnitud del efecto *Exchange Bias*. El campo de intercambio H_E esta dado por

$$H_E = \frac{\sigma_{EB}}{\mu_0 M_{FM} t_{FM}} \quad (6)$$

donde M_{FM} y t_{FM} son la magnetización y el espesor de la capa ferromagnética adjunta a la antiferromagnética, σ_{EB} la densidad de energía superficial en la interfaz FM-AFM. La tabla 1 da algunos valores de σ_{EB} .

Tabla 1

Material AF	σ_{EB} (mJ/m ²)	T_N (°C)	T_B (°C)
Fe50Mn50	0.05-0.47	217	150
Ni50Mn50	0.16-0.46	797	497
Pt50Mn50	<0.32	207	127
Ir18Mn82	0.19	417	265
NiO	0.05-0.48	252	180
CoO	0.14-0.48	20	<20

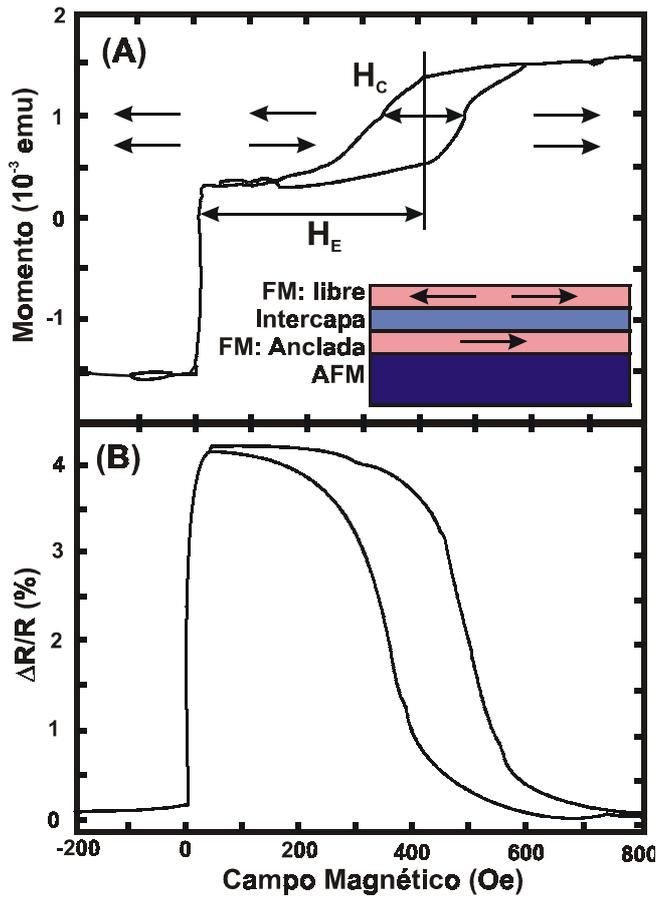


Figura 6. Ciclo de histéresis (gráfica superior) y magnetorresistencia $\Delta R/R$ (gráfica inferior) a temperatura ambiente para una válvula de espín (esquema) formada por la multicapa $Fe_2O/Ni_{80}(6nm)/Cu(2.2nm)/Fe_2O/Ni_80(4nm)/FeMn(7nm)$. Las flechas indican las orientaciones de la magnetización en las películas magnéticas. Adaptado de B. Dieny²⁶.

El efecto de la polarización de intercambio se puede explicar asumiendo una capa FM en contacto con una capa AFM y la interfaz entre las dos es ideal (planos atómicos paralelos a la superficie). El sistema se ha enfriado en un campo externo (field cooling) por debajo de la temperatura de Niel de la capa AFM. En la capa FM todos los momentos magnéticos están orientados en la misma dirección y paralelos a la interfaz; en la capa AFM la dirección de magnetización se cambia de un plano al siguiente como se ilustra en la figura 7a. Se asume que el alineamiento del material antiferromagnético es rígido, es decir, tiene una alta anisotropía (que correspondería a una alta temperatura de bloqueo, T_B). Para una interfaz completamente no compensada, es decir, todos los espines en la superficie límite tienen la misma dirección, el efecto de intercambio puede ser estimado, y es comparable con el intercambio entre los momentos magnéticos vecinos de

la capa ferro y de la antiferro. Los valores calculados para S_{EB} con estas suposiciones son dos órdenes de magnitud mayor que el encontrado experimentalmente. Además, aun en superficies completamente compensadas el efecto de polarización de intercambio tampoco puede ser explicado con el simple modelo indicado en la figura 7a. Se han propuesto varios modelos para explicar la discrepancia con los resultados experimentales. Mencionaré solamente el modelo de paredes de dominio y el modelo de campo aleatorio.

El modelo de pared de dominio propuesto por Mauri y colaboradores²⁸ atribuye el debilitamiento del efecto de intercambio interfacial al hecho de que los momentos magnéticos en el material antiferromagnético no son completamente rígidos. Los momentos magnéticos del antiferro en la interfaz son atraídos por los del ferro haciendo que se forme en el antiferro una pared de dominio paralela al plano de la muestra, como se ilustra en la figura 7b. Nótese que en este modelo la reducción en el intercambio interfacial

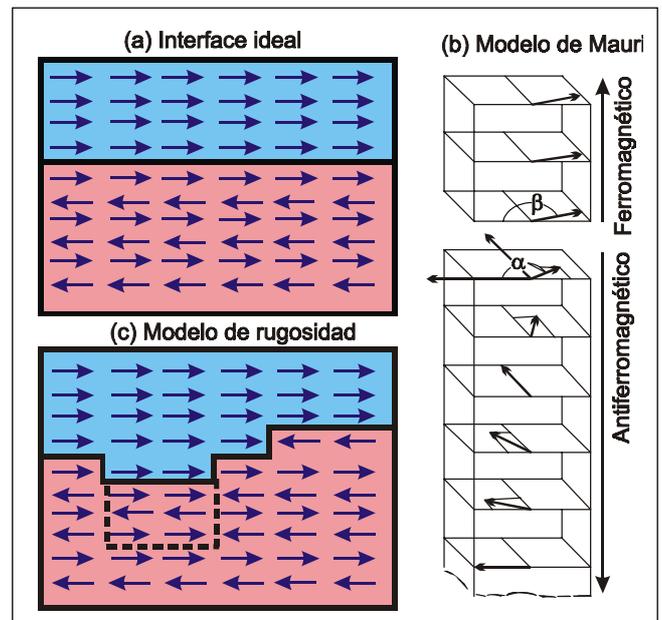


Figura 7. (a) Anisotropía de intercambio en una interfase ideal: Asumiendo un acoplamiento ferromagnético a través de la interfaz, los espines de la capa ferromagnética están no-compensados y se orientan de la misma manera que en la capa ferromagnética. (b) Formación de una pared de dominio en el antiferromagneto cuando la capa ferromagnética es magnetizada hacia la derecha. Arreglo no compensado cuando el acoplamiento de intercambio es mayor que la de anisotropía. (c) Interfaz real, con rugosidad en este caso. La interacción de intercambio entre vecinos próximos no puede ser enteramente satisfecha por lo tanto se tiene frustración de la orientación de los espines y la formación de paredes de dominio conduciendo a que el número efectivo de espines no compensados en la interfase se reduzca. Adaptado de Mauri²⁸.

ferro/antiferro ocurre aun en el caso de una interfaz atómicamente abrupta, entonces el efecto de intercambio esta relacionado más con la energía de la pared de dominio que con el intercambio interfacial en la superficie límite FM-AFM.

Este modelo es diferente al modelo de campo aleatorio planteado por primera vez por Malozsemoff²⁹ y esta basado en la rugosidad interfacial que siempre aparece en multicapas. En el caso de una superficie intrínsecamente no compensada la rugosidad da lugar a la formación de terrazas con espines en direcciones opuestas y por lo tanto a una compensación mesoscópica, como se esquematiza en la figura 7c. Sin embargo, en este caso un número pequeño de espines no compensados puede aparecer debido a los bordes de los escalones. Tanto en superficies compensadas como no compensadas se puede asumir la formación de dominios en la capa antiferromagnética cuando la capa ferromagnética es ordenada en un campo externo y el sistema es enfriado por debajo de la temperatura de bloqueo. En ambos modelos, la formación y el movimiento de paredes de dominio en el AFM al invertir la dirección del campo da lugar al aumento del campo coercitivo observado experimentalmente. En general se admite que el efecto de la polarización de intercambio es debido a los espines compensados en la interfaz FM/AFM, pero el número es mucho menor que en la superficie idealmente compensada. Una descripción realista debe incluir la rugosidad y el tamaño de grano así como ordenamientos no-colineales de los espines en la interfaz; esto depende explícitamente del tipo de material ferro/antiferro que forma la interfaz. En varios sistemas han sido observadas situaciones en las cuales los espines se orientan perpendiculares al eje fácil del AFM, lo que muestra la complejidad del efecto de polarización de intercambio en sistemas reales.²⁵ La figura 8 muestra una representación simplificada del efecto de polarización de intercambio en la curva de histéresis de una bicapa FM/AFM con una interfaz ideal. Con la introducción de técnicas modernas tales como difracción magnético con rayos X, espectroscopias usando radiación sincrónica y microscopias de fuerza magnética³⁰ es posible una visualización directa de los dominios magnéticos en las capas FM y AFM; esto permitiría una información más detallada de la anisotropía de intercambio que es usada en el desarrollo de modelos más elaborados para explicar este fenómeno.

5. Aplicaciones de Multicapas Magnéticas

La técnica de Pulverización catódica (sputtering) ha permitido el crecimiento de multicapas magnéticas de muchos sistemas, vgr., superredes de los sistemas Fe-Cr y

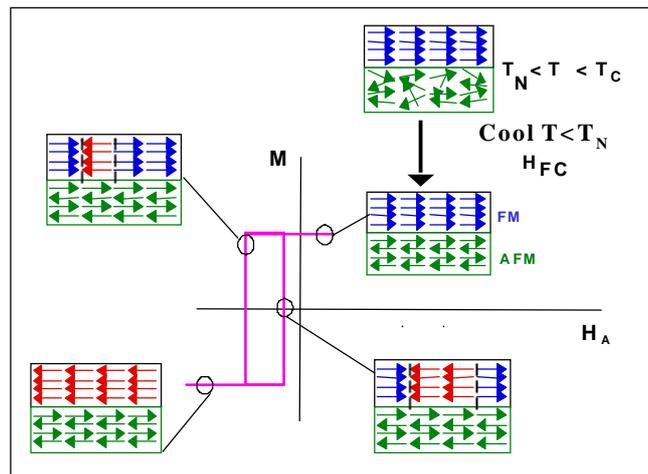


Figura 8. Ordenamiento de los espines en una interfaz FM/AFM cuando es enfriada en un campo magnético a temperatura T por debajo de la Temperatura de Neel (T_N) y el campo magnético aplicado H_A realiza un ciclo completo de histéresis.

óxidos de materiales, como las manganitas. En superredes metálicas el efecto de GMR ha alcanzado valores del orden del 110% a temperatura ambiente; valores entre el 50 al 60% pueden conseguirse con valores de campo que no superan los cientos de Oersted, y del 20 % con no más de unas decenas de Oersted. Estos valores de magnetorresistencia a temperatura ambiente hacen este sistema muy atractivo para una variedad de aplicaciones. Adicionalmente, dado el hecho de que estas multicapas se pueden preparar usando el método de pulverización catódica, el cual es perfectamente compatible con los de producción a gran escala de dispositivos electrónicos, hace más llamativo su uso en aplicaciones tecnológicas.

Las multicapas magnéticas son usadas en una gran variedad de aplicaciones como detectores de campo magnético: En la detección de la rotación de un objeto que gira, como por ejemplo, en sistemas de frenos en automóviles; detección de bits magnéticos en discos duros, etc. Hoy en día son necesarios, sistemas de multicapas cuya resistencia sea sensible a campos magnéticos bajos. Multicapas con efecto de GMR pueden alcanzar sensibilidades a campos bajo con mayor sensibilidad que sensores convencionales. En noviembre de 1997 IBM introdujo la primera generación de discos duros designada como "Deskstar*-16GP", cuya cabeza lectora era una multicapa magnética que usa el efecto de GMR, con la capacidad de leer áreas extremadamente pequeñas que corresponden a densidades de hasta 2.69 gigabits por pulgada cuadrada. Las cabezas de GMR permiten que densidades de almacenamiento mayores que 3.2 gigabytes por pulgada cuadrada puedan ser leídas en un disco 3.5- pulgadas de diámetro. La rápida evolución

de la tecnología de almacenamiento magnético se ilustra en la figura 9.³¹ Para este año se prevé que se alcance 250 gigabits por pulgada cuadrada.

6. Crecimiento de las superredes magnéticas

En el laboratorio de Películas Delgadas de la Universidad de California, en San Diego, (USA) fueron crecidas por la técnica de magnetron sputtering multicapas del sistema Nb-(Fe/Cr)_N-Nb. En este experimento se fijó el espesor de la capa ferromagnética y la capa normal a Fe(3nm)/Cr(1.2nm) y se varió la presión, P, del gas residual.

El espesor de la capa de Cr corresponde al primer pico del acoplamiento antiferro-magnético señalado para la superred (110) Fe/Cr.¹³ Las superredes fueron crecidas sobre sustratos de Si, a temperatura ambiente. Como la estructura interfacial de la superred es fuertemente sensible a las condiciones de crecimiento, se tuvo bastante cuidado en blindar el haz de partículas, para evitar contaminación; en mantener constante la rata de deposición así como la potencia durante el proceso de pulverización. La rugosidad interfacial fue variada sistemáticamente cambiando la presión del gas durante el crecimiento, y aumentando el espesor total de la superred. Para mediciones de magnetorresistencia en la geometría CPP, se crecieron multicapas de Nb/Fe-Cr/Nb, en donde el Niobio superconductor sirve como electrodo. Las capas de Nb fueron crecidas *in situ* a una presión 3 mTorr y a temperatura ambiente.

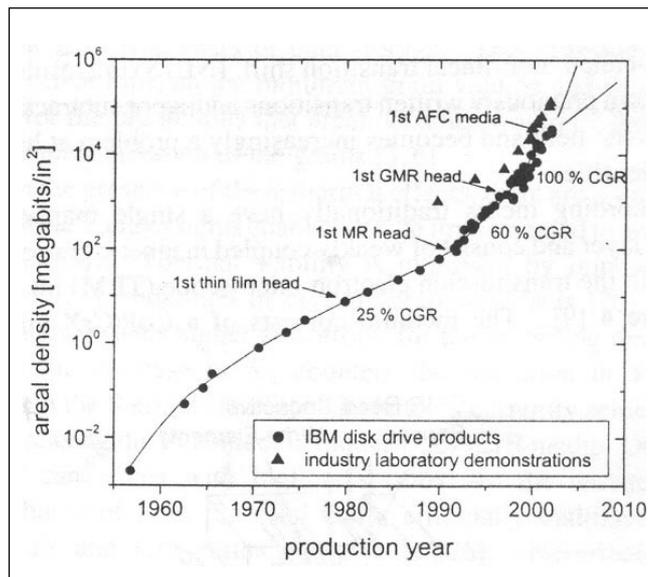


Figura 9. Progresos en la densidad de almacenamiento magnético desde su invención. Gráfica cortesía de Grochowski.³¹

Las multicapas fueron caracterizadas estructuralmente por difracción de rayos X (XRD) a bajo ángulo y técnica de mapeo de composición química por espectroscopía de pérdida de energía de electrones (EELS) en imágenes de microscopía electrónica (EFTEM). La figura 10 muestra la caracterización estructural de la interfaz por XRD de una multicapa de Nb/[Fe(12nm)Cr(3nm)]_N/Nb y la imagen EFTEM en corte transversal de la misma multicapa. Estas técnicas complementarias permiten extraer valores cuantitativos de la rugosidad interfacial.

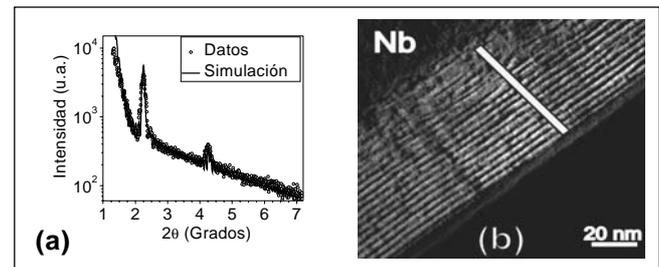


Figura 10. Espectro de difracción de rayos X a bajo ángulo (a) y micrografía EFTEM (b) de una superred de Fe/Cr entre electrodos de Nb.

7. Medidas de magnetotransporte en superredes de Fe/Cr

Las mediciones de magneto transporte fueron realizadas con la geometría CPP, la cual permite obtener medida de la resistividad y de la magnetorresistencia independientemente. Para las mediciones de resistencia y magnetorresistencia con la geometría corriente en el Plano (CIP de sus siglas en ingles Current in Plane) se depositó la superred directamente sobre el sustrato de silicio, y usando fotolitografía óptica se hizo un puente de 40 μm de ancho, el cual permite realizar medidas de cuatro puntas con una geometría definida. Para las mediciones de resistencia y MR en la geometría CPP se realizó un procedimiento fotolitográfico que asegure que la corriente fluye en dirección perpendicular al plano de la película. Para esto se diseñó el litografiar columnas de área transversal de algunas micras cuadradas, y conectarlas en serie. El procedimiento fotolitográfico seguido es descrito con detalle por Cyrille y Gómez.³³ Un corte transversal de las columnas de la superred y su conexión en serie con los electrodos de Nb se ilustra esquemáticamente en la figura 11 (a). Una fotografía óptica del plano superior de la muestra litografiada se muestra en la figura 11 (b), en donde se indican la dirección del flujo de la corriente I y los puntos donde se lee la caída de potencial. Cuando el Nb es superconductor, la distribución de corriente en los electrodos de Nb es uniforme y la corriente fluye perpendicular al plano del sustrato dentro de las columnas.

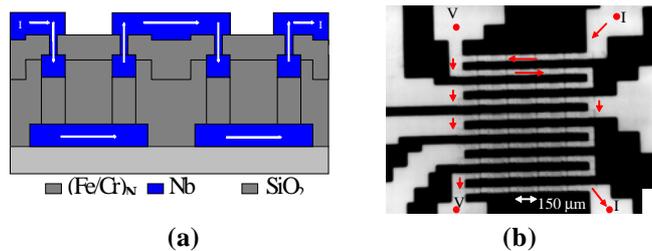


Figure 11. (a) Esquema transversal de las pilas fotolitografiadas para mediciones de transporte en la geometría CPP³³ en las multicapas Nb/[Fe/Cr]_N/Nb. (b) Microfotografía óptica de una muestra típica. Las flechas indican la dirección de circulación de la corriente I; V los puntos donde se lee la caída de potencial.

Las mediciones de resistencia fueron realizadas con la técnica usual de cuatro puntas. La resistividad se determina siempre promediando las mediciones tomadas con corrientes en direcciones opuestas para así promediar cualquier corrimiento en el voltaje.

La figura 12 muestra las medidas de magnetorresistencia en la geometría CPP y la geometría CIP en muestras crecidas simultáneamente³⁴. Como puede observarse el efecto GMR es mayor cuando la corriente circula perpendicular a las interfaces.

Se realizaron medidas de magnetización a baja temperatura (10 K) con el fin de obtener una medida cuantitativa de la fracción de la muestra que está alineada antiferromagnéticamente, fracción que contribuye a la magnetorresistencia gigante de acuerdo con el siguiente argumento. La

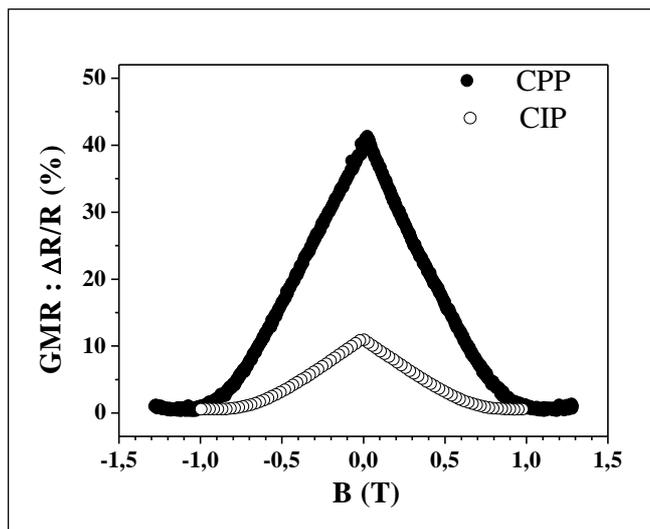


Figura 12. Magnetorresistencia en una superred de Fe/Cr medida con las geometrías CIP (círculos abiertos) y CPP (círculos llenos)

figura 13 (a) muestra esquemáticamente una interfaz Fe/Cr, en la cual el espesor de Cr es tal que las capas de Fe se alinean antiferromagnéticamente. El ciclo de histéresis correspondiente se muestra en (b), en donde la magnetización remanente es cercana a cero que es lo esperado de un alineamiento antiferromagnético, pero el cual puede revertirse a través de ángulos de 90° entre capas magnéticas adyacentes.³⁵ La relación M_r/M_s se puede interpretar como una medida del volumen de la muestra que está alineada ferromagnéticamente. Cuando hay rugosidad interfacial la relación M_r/M_s es menor debido a cambios locales en el acoplamiento entre capas ó a cortos magnéticos, tal como se esquematiza en (c). El ciclo de magnetización correspondiente se muestra en la figura 13 (d). De los ciclos de histéresis se puede extraer la magnetización remanente y de saturación y el campo coercitivo. La expresión:

$$(1 - M_r/M_s) \quad (7)$$

define la fracción volumétrica de la muestra que está acoplada antiferromagnéticamente. Las mediciones de magnetización se hicieron usando un SQUID, a 10K.

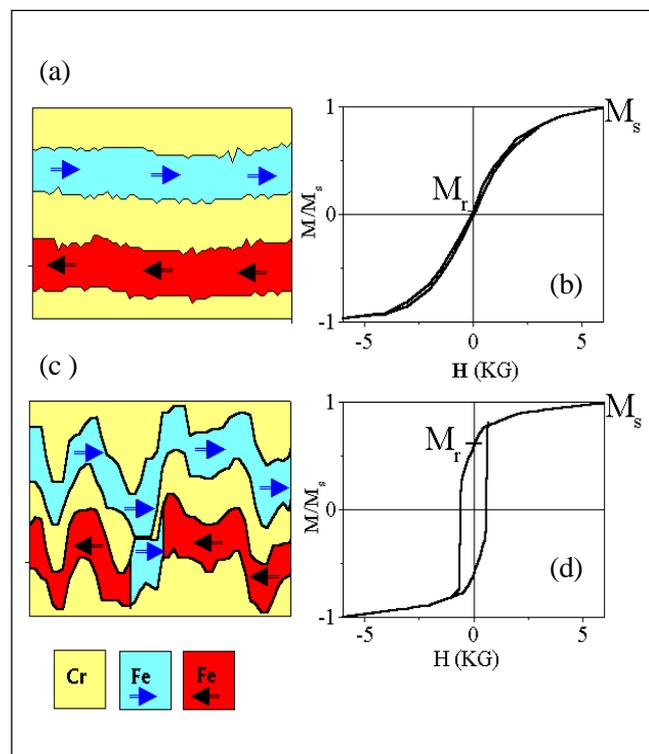


Figura 13. Esquema de dos perfiles interfaciales en una superred mostrando una muestra alineada antiferromagnéticamente total (a) y parcialmente (c). Los respectivos ciclos de magnetización normalizados se muestran en (b) y (d) respectivamente.

La figura 14 muestra la dependencia de la magnetización remanente (M_r) normalizada a la magnetización de saturación (M_s) con el número de bicapas N (a) y con la presión de sputtering³³ (b) para superredes de $[\text{Fe}(3\text{nm})/\text{Cr}(1.3\text{nm})]_{20}$. Observamos un decrecimiento leve del 10% de M_r/M_s cuando se incrementa N en el rango entre 10 a 60 bicapas; con un valor calculado de M_r/M_s es de. La relativa insensibilidad de esta razón con el número de bicapas provee una fuerte evidencia del grado de correlación grado entre rugosidad y parámetros de crecimiento. En la dependencia con la presión, figura 14 (b), se observa un incremento M_r/M_s con el incremento de la presión en el rango de 4 a 12 mTorr, indicando una disminución ó pérdida del acoplamiento antiferromagnético. Ese incremento de M_r/M_s se puede deber a, por ejemplo, un incremento en la densidad de cortos ferromagnéticos entre las capas de hierro a través de la capa de cromo (debido a lo que se conoce como *pinholes*), figura 13(c), talvez en las fronteras de grano; ó quizás a fluctuaciones del espesor de la capa de Cr que cambian el acople antiferromagnético localmente, figura 13(c).

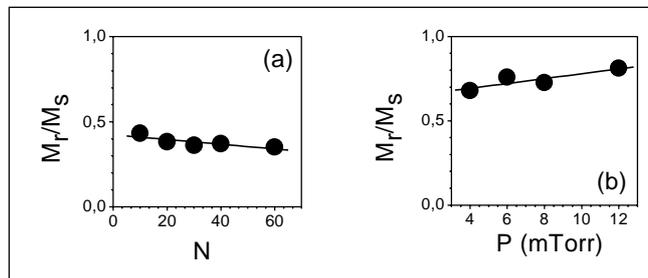


Figura 14. Magnetización remanente M_r normalizada a la magnetización de saturación M_s , (a) como función de N , para muestras crecidas a 5 mTorr; (b) como función de la presión de sputtering para $N=20$. La línea continua es ayuda visual.

Las medidas de transporte fueron hechas en superredes de $[\text{Fe}(3\text{nm})/\text{Cr}(1.2\text{nm})]_N$, con $10 \leq N \leq 40$ en ambas geometrías, corriente perpendicular al plano (CPP) y corriente en el plano (CIP). Por debajo de la temperatura crítica, T_c , del Nb las 100 columnas conectadas en serie proveen una resistencia en el rango de $\text{m}\Omega$, la cual puede ser medida por métodos convencionales. La distribución uniforme de corriente en los electrodos superconductores y la pequeña resistencia de contacto superred-electrodo nos permite asegurar que la resistencia medida es la intrínseca de la superred.

Una observación detallada de esas gráficas nos permite aseverar lo siguiente: La resistividad en la geometría

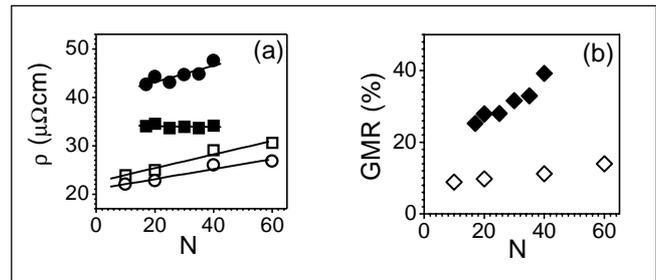


Figura 15 (a) Resistividad en la configuración magnética antiparalela ρ_{AP} (cuadros) y en la configuración paralela ρ_p (círculos) como función de N en las geometrías CIP (símbolos abiertos) y CPP (símbolos llenos) para superredes $[\text{Fe}(3\text{nm})/\text{Cr}(1.2\text{nm})]_N$. (b) Relación GMR como función de N en la geometría CIP (diamantes abiertos) y CPP (diamantes llenos). Las líneas son ayuda visual.

CPP es siempre mayor que en la geometría CIP; En la geometría CPP ρ_{AP} muestra un rápido incremento con N mientras ρ_p permanece constante; los valores medidos de GMR en la geometría CPP son siempre mayores hasta por un factor 4 que en la geometría CIP. El incremento de la resistividad CIP y GMR con N puede ser explicado por un incremento de la rugosidad correlacionada en la columna de la superred. Cuando N aumenta, la rugosidad correlacionada alcanza a ser suficientemente alta para tener una contribución sustancial de la corriente fluyendo a través de las interfaces.

Una posible explicación del incremento de GMR en la geometría CPP es el incremento de la dispersión dependiente de espín con la rugosidad. En saturación, los electrones de una orientación de espín dominan el transporte. Siendo ρ_p constante con N indica que esos electrones son débilmente dispersados por el incremento en la rugosidad. De otro lado, ρ_{AP} y GMR incrementan con N mientras los electrones de ambas direcciones de espín contribuyen al transporte. Consecuentemente los electrones mayoritarios son fuertemente dispersados por el desorden interfacial y la rugosidad correlacionada actúa como un potencial de dispersión altamente selectivo de espín.

El efecto GMR puede ser explicado cualitativa y cuantitativamente teniendo en cuenta una asimetría de espín de los parámetros que describen las propiedades de transporte de dos canales de espín, hacia arriba (\uparrow) y hacia abajo (\downarrow) para los electrones de conducción³⁶.

Como se muestra en la figura 16, ambas magnetorresistencia, GMR ($\Delta\rho$), y resistividad (r) crecen con el incremento de la presión. Esto es una clara indicación de un incremento de la dispersión dependiente de espín y aquí un aumento de la asimetría de espín de la dispersión.

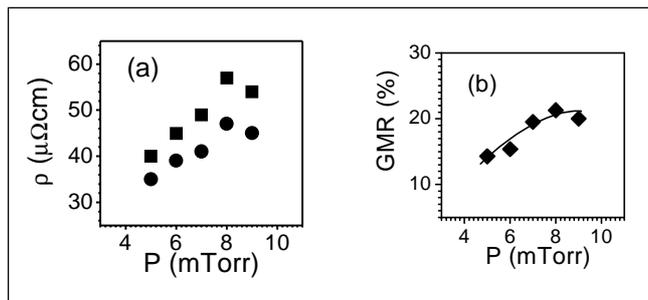


Figura 16. (a) Dependencia con la presión de la resistividad CPP para superredes de $[\text{Fe}(3\text{nm})/\text{Cr}(1.2\text{nm})]_{20}$ en la configuración magnética antiparalela ρ_{AP} (cuadrados) y paralela ρ_p (círculos). (b) Relación CPP-GMR como función de la presión de sputtering. Línea es guía visual.

8. Efecto de Polarización de Intercambio y propiedades de magneto-transporte en superredes de manganitas

Los óxidos magnéticos han sido objeto de una intensa actividad investigativa en los últimos años en particular para entender y ampliar las observaciones de la magnetorresistencia colosal (*Colossal Magneto Resistance CMR*) que fue observada en películas magnéticas tipo perovskita,^{37,38} así como el efecto del *Exchange Bias* o polarización de intercambio en interfaces de óxidos ferromagnéticos con óxidos antiferromagnéticos. En este tipo de estructuras un entendimiento del fenómeno de intercambio aun esta lejos de ser comprendido.²⁵

Si el espesor de la capa ferromagnética (t_{FM}) es menor que el espesor de la pared de dominio (δ_{dw}), la respuesta de la capa FM a un campo aplicado causa una rotación de los espines en la capa antiferromagnética cerca a la interfaz. En esta aproximación el campo de *intercambio* viene dado por:³⁹

$$H_E = -2 \frac{K_{AFM} \delta_{AFM}}{M_s t_{FM}} \quad (8)$$

donde δ_{AFM} es el espesor de la pared de dominio y K_{AFM} es el coeficiente de anisotropía magnética en la capa antiferromagnética (AFM).

La existencia de polarización de intercambio en multicapas de manganitas con capas alternas de la fase ferromagnética $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ y la fase antiferromagnética $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$ ha sido registrada previamente.^{40,41} Estos resultados revelan que una polarización de intercambio aparece en estas multicapas a temperaturas por debajo de la temperatura de bloqueo (T_B), que es menor que la temperatura de Neel T_N de la capa AFM y la temperatura de curie T_C de la capa FM. Por encima de T_B el orden AFM en los granos no es suficientemente estable para soportar la polarización de intercambio⁴², por debajo de T_B el orden AFM se hace esta-

ble siendo la anisotropía direccional a bajas temperaturas dependiente de la energía de la pared de dominio cerca a la interfaz. Adicionalmente se ha observado que el acoplamiento de intercambio para $T_B < T_N$ muestra un ciclo de histéresis asimétrico debido a la transición irreversible del desorden AFM de los dominios en la capa AF. En esta sección se discuten los resultados del efecto de intercambio en superredes epitaxiales $[\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3(20\text{u.c.})/\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3(N\text{ u.c.})]_{14}$ como función de la temperatura y del número de celdas unitarias (N) de la capa FM.

Las superredes FM/AF fueron crecidas sobre sustratos monocristalinos de SrTiO_3 con orientación (100) usando un método de pulverización catódica a altas presiones de oxígeno⁴³ existente en el grupo de películas delgadas de la Universidad del Valle. Se usaron blancos sinterizados con estequiometrías $\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3$, para las capas (AFM) y $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ para las capas FM. El crecimiento de las superredes se lleva a cabo en una atmósfera de oxígeno a 3.5 mbar y a temperaturas de sustrato de 850°C; la tasa de deposición fueron aproximadamente 1.5 nm/min para ambos tipos de óxidos magnéticos. La modulación L de la bicapas varió entre 6 y 13 nm y el espesor total de las multicapas fue de aproximadamente de 180 nm. Las mediciones magnéticas fueron hechas en un magnetómetro SQUID de Quantum Design™. Los campos coercitivos y el campo de intercambio fueron obtenidos de ciclos isotérmicos de magnetización a bajas temperaturas después de un enfriamiento en la presencia de campo magnético de 20 KOe desde temperatura ambiente hasta 20 K.

Una imagen de microscopía electrónica en sección transversal mostrando las interfaces entre una capa AFM y dos FM se muestra en la figura 17. Esta medida corrobora

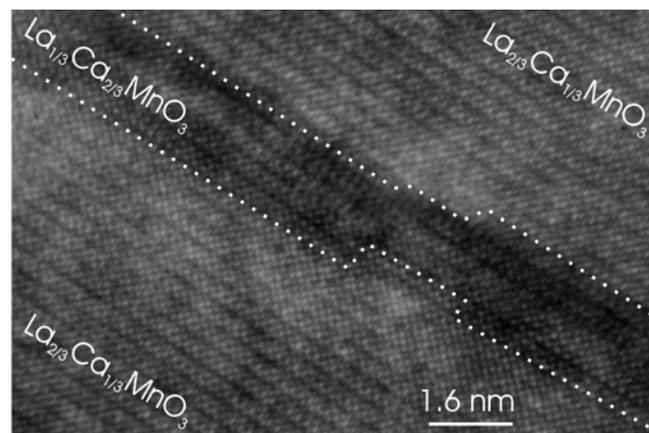


Figura 17. Micrografía de microscopía electrónica de transmisión (TEM) con resolución de plano atómico de la superred de $[\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3(20\text{u.c.})/\text{La}_{1/3}\text{Ca}_{2/3}\text{MnO}_3(5\text{ u.c.})]_N$.

ra los análisis de difracción de rayos X mostrados en la figura 18 para una superred $[AF_{15u.c.}/FM_{3u.c.}]_{21}$.

El espectro de rayos X a alto ángulo muestra picos de superestructura debido a la modulación química de la superred. La modulación obtenida de la posición de estos picos para esta estructura fue 7 nm en buena concordancia con el valor nominal usando la tasa de deposición de cada una de la capas. La gráfica interior muestra la simulación de la superred usando el programa de refinamiento SUPREX 9.0⁴⁶ obtenido del laboratorio de películas delgadas del profesor I. K Schuller en UCSD. La simulaciones en esta estructura nos permiten afirmar que la rugosidad interfacial es del orden de una constante de red como se puede observar el los análisis de TEM.

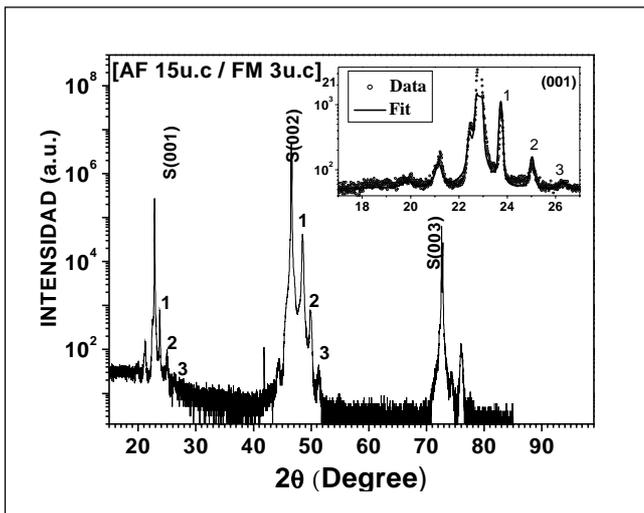


Figura 18. Patrón de difracción de rayos X a ángulo grande para una superred $[AF_{15u.c.}/FM_{3u.c.}]_{21}$ crecida sobre un sustrato monocristalino de $SrTiO_3$. Los picos de Bragg del sustrato están marcados con una (S). El orden de los picos satélites está indicado. El recuadro muestra la simulación con SUPREX 9.0 de la estructura^{44,45}

En la figura 19 se muestran las medidas de magneto-resistencia para la superred $[AF20\text{ u.c.}/FM15\text{ u.c.}]_{14}$ a 15 K. La curva de MR muestra una asimetría en la altura y posición del máximo debido, probablemente, a los efectos de interfaz entre las capa FM y AFM presentes en el sistema. Estos resultados concuerdan bastante bien con reportes recientes en multicapas de manganitas⁴⁷. Ciclos de histéresis isotérmicos fueron medidos para todas las superredes, sin campo, ZFC, y con campo aplicado, FC.

La figura 20 muestra dos ciclos de histéresis para la superred de 16 bicapas con espesores AF de 20u.c., y FM de 10 c.u. El campo de enfriamiento fue de 2.0 KOe. El

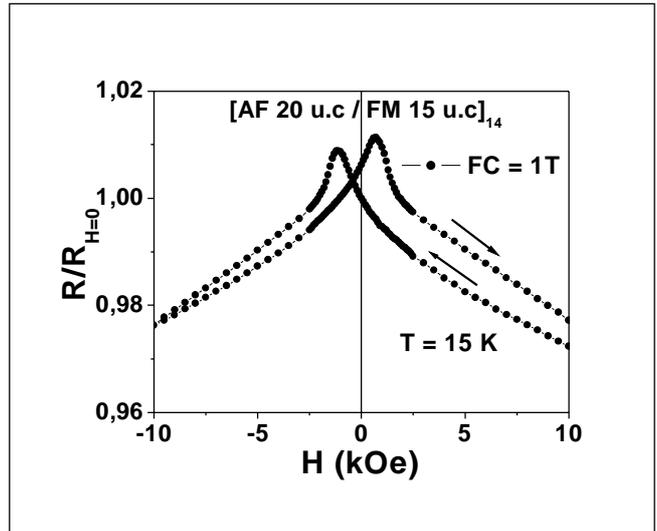


Figura 19. Magneto-resistencia normalizada medida a 15 K después de un enfriamiento en campo magnético, FC, desde temperatura ambiente. Las flechas indican la dirección del cambio de campo magnético⁴¹

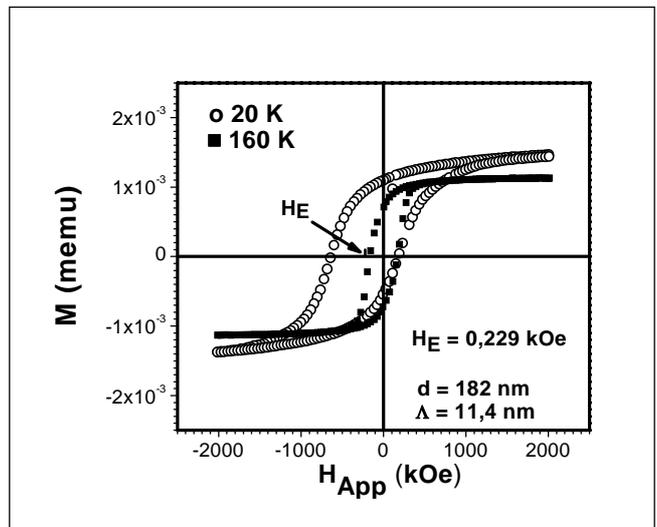


Figura 20. Ciclos de histéresis de la superred magnética $[AF_{20u.c.}/FM_{10u.c.}]_{16}$, medida a 20 y 160 K después de un enfriamiento en un campo de 2.0 KOe desde temperatura ambiente.

ciclo a 160 K es simétrico con respecto al ciclo de campo cero mientras que el ciclo de campo 20 K presenta un corrimiento de 229 Oe, evidenciando el efecto de polarización de intercambio en estas superredes. Estos resultados son consistentes con el valor de la T_N de la capa AFM que es aproximadamente 150 K.

Para todas las superredes se analizó la dependencia del campo H_E con temperatura. En un conjunto de muestras

hemos dejado el espesor de la capa antiferromagnética fija en 20 u.c., y hemos variado el espesor de la capa ferromagnética entre 10 y 20 u.c. Para cada superred se encontró una dependencia exponencial de H_E con la temperatura, como la que se muestra en la figura 21 para la superred $[AF_{20 \text{ u.c.}}/FM_{10 \text{ u.c.}}]_{16}$. Los datos ajustan a un decaimiento exponencial del tipo:

$$H_{ex} = H_0 * \exp\left(-\frac{T}{T_0}\right) + C \quad (9)$$

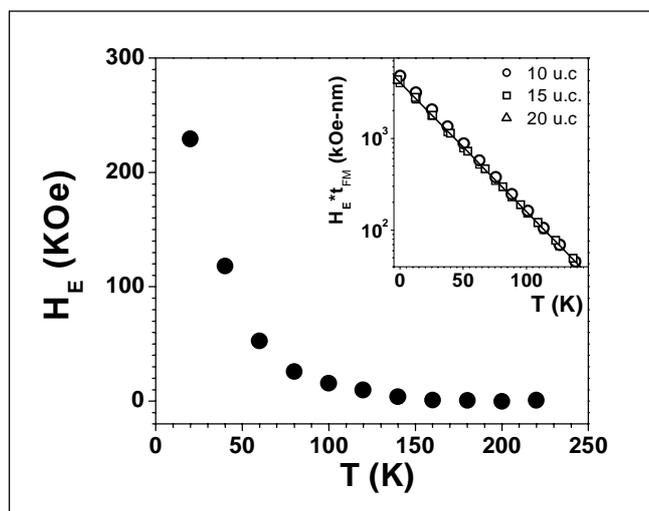


Figura 21. Dependencia del campo de intercambio H_E con la temperatura para la superred $[AF_{20 \text{ u.c.}}/FM_{10 \text{ u.c.}}]_{16}$. La figura interior muestra el producto $H_E * t_{FM}$ como función de la temperatura para superredes con $t_{AFM} = 20 \text{ u.c.}$ y diferentes valores de t_{FM} : 10 u.c., círculos, 15 u.c., cuadrados, y 20 u.c. triángulos.

Esta dependencia es consecuencia de la frustración de la orientación de los momentos magnéticos en la interfaz entre las capas ferro y antiferro debido a interacciones competitivas; esta dependencia ha sido observada también en el sistema la ferrita $NiFe_2O_4$ ⁴⁸. El producto H_E por el espesor de la capa ferromagnética t_{FM} , para todos los espesores t_{FM} , mostrado en la figura insertada, cae sobre una única recta, indicando que el mecanismo del *Exchange bias* en este sistema es independiente del espesor de la capa ferromagnética.

9. Conclusiones

Es realmente sorprendente que en menos de una década las superredes magnéticas hayan pasado de ser una curiosidad científica a convertirse en materiales de una enorme importancia tecnológica. Este tipo de estructuras presenta

una serie de considerable de nuevos fenómenos y efectos físicos no predecibles 20 años atrás, algunos de los cuales hemos estudiado; y parte de esos resultados han sido discutidos en este trabajo. El estudio de sus propiedades estructurales y de magneto-transporte junto con el avance en las técnicas de preparación, específicamente la de pulverización catódica en atmósfera de oxígeno a altas presiones, la cual disponemos en el laboratorio de películas delgadas, nos ha permitido elaborar estructuras con espesores de solamente dos a tres capas atómicas, con la reproducibilidad suficiente para hacer estudios sistemáticos. Los análisis futuros parecen dirigirse al estudio de nano-estructuras magnéticas con materiales estructurados en una dimensión en alambres cuánticos o en cero dimensiones como puntos cuánticos. Específicamente, los resultados obtenidos en el laboratorio de películas delgadas en colaboración mutua con otros grupos de investigación en el crecimiento, caracterización y análisis de superredes magnéticas, nos ha permitido incursionar en el campo de nanoestructuras magnéticas de óxidos de materiales. Se han hecho contribuciones importantes en las propiedades magnéticas de estas superredes y su dependencia con los parámetros de crecimiento, reflejadas en publicaciones en revistas científicas de circulación internacional⁴⁹ además de las mencionadas a lo largo del texto. Pero lo más importante es que me ha permitido contribuir con la formación de jóvenes científicos al más alto nivel, reflejado en las tesis de maestría y doctorado en física, no solo en el campo de las superredes magnéticas sino en los otros tipos de óxidos y heteroestructuras que se estudian en el grupo de investigación.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todos los miembros del Grupo de Películas Delgadas (GPD) de la Universidad del Valle, especialmente a la profesora M. E. Gómez, por hacer disponibles sus resultados en multicapas de Fe/Cr, al profesor I. Schuller de la UCSD en San Diego, California, por el apoyo dado al GPD en los últimos años, al Profesor J. Guimpel del Centro Atómico de Bariloche, Argentina por los análisis estructurales en multicapas de manganitas, y a La Universidad del Valle y a COLCIENCIAS por el soporte dado al GPD a través de diversos proyectos de investigación.

Bibliografía

- 1 Schuller, Ivan K. *Phys.Rev. Lett.* **44** 1597 (1980).
- 2 Gradmann U. "*Handbook of Magnetic Materials*" Elsevier (1993).
- 3 de Jorge W.J.M. et al. In "*Ultrathin Magnetic Structures*" Springer Verlag (1994).

- 4 **Schuller, I. K. S. Kim, C Leighton.** *J. Magn Magn Matter* **200** 571, 582 (1999).
- 5 **Mitani S. et al.** *J. Magn. Matter* **156**, 7 (1996).
- 6 **Li, Y. K.** Baberschke *Phys. Rev. Lett.* **68** 1208 (1992).
- 7 **Santamaría, J. J. L. Vicent, I. K. Schuller.** *Revista Española de Física* **16**(3) 12 (2002).
- 8 **Baibich, M. N. et al.;** *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
- 9 **Binasch, G. P. Grünberg, F. Saurenbach and W. Zinn,** *Phys. Rev. B* **39** 4828 (1989).
- 10 **Grünberg P. et al.** *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2442 (1986).
- 11 “Desarrollo de Dispositivos magnetoelectrónicos de multicapas magnéticas basadas en manganitas”, Colciencias-Univalle 2002-2005; “Nanoscale characterization of ferroelectric thin films”, Colciencias-Univalle 2003-2005; “Structural and transport studies in Fe-Cr magnetic superlattices”, UCSD-Univalle 1998-2003.
- 12 **Campbell I. A. and A. Fert,** in “*Ferromagnetic Materials*”, ed. E. P. Wohlfarth, North Holland, Amsterdam (1982).
- 13 **Parkin, S. S. P. N. More, and K. P. Roche,** *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2304 (1990).
- 14 **Parkin, S. S. P.** *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3598 (1991).
- 15 For a review, see M. A. M. Gijs and G. E. W. Bauer, *Adv. in Phys.* **46**, 285 (1997)
- 16 **Barthelemy, A. A. Fert and F. Petroff,** in *Handbook of Magnetic Materials*, Vol. **12**, ed. K. H. J. Buschow, p.1 (1999)
- 17 **Fert, A. and I.A. Campbell,** *J. Phys. F* **6** 849 (1976)
- 18 **Camley R. E. and J. Barnas,** *Phys. Rev. Lett.* **63**, 664 (1989)
- 19 **Inoue J. and S. Maekawa,** *Prog. Theor. Phys.* **106**, 187 (1991); H. Ito, J. Inoue, and S. Maekawa, *Phys. Rev. B* **51**, 342 (1995).
- 20 **Pratt W. P. Jr., S.-F. Lee, J. M. Slaughter, R. Lo loe, P. A. Schroeder and J. Bass,** *Phys. Rev. Lett.* **66**, 3060 (1991).
- 21 **Gijs, M. A. M. et. al;** *Phys. Rev. Lett.* **70**, 3343 (1993).
- 22 **Zhang S. and P. M. Levy, J. Appl. Phys.** **69**, 4786 (1991); T. Valet and A. Fert, *Phys. Rev. B* **48**, 7099 (1993); S.-F. Lee et al., *Phys. Rev. B* **52**, 15426 (1995).
- 23 **Weber W. et al.** *Phys. Rev. Lett.* **78** 3424 (1996).
- 24 **Meiklejohn, W. H. C. P. Bean,** *Phys. Rev.* **102** (5) 1413 (1956).
- 25 Para una revisión ver por ejemplo J. Nogués, I. K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.* **192** 203 (1999).
- 26 **Dieny, B. J.** *Magn Magn Matter.* **136** 335 (1994)
- 27 **Buerler D. and P. Gruenberg** KFZ Juelich Ferien Schule A41-A425 (2000).
- 28 **Mauri, D. et al.;** *J. Appl. Phys.* **62**, 3047 (1987).
- 29 **Malozemoff, A.P.** *Phys Rev. B* **35**, 3679, (1987)
- 30 **Nolting F. et al.** *Nature* **405**, 767 (2000).
- 31 **Moseret A et al.;** *J. Phys D Appl. Phys.* **38**, 4157-R167 (2002).
- 32 **Fullerton, E. E. D. M. Kelly, J. Guimpel and Ivan K. Schuller,** *Phys. Rev. Lett.* **68**, 859 (1992).
- 33 **Cyrille, M. C. S. Kim, M.E. Gomez, J. Santamaría, Kannan M. Krishnan and Ivan K. Schuller,** *Phys. Rev. B* **62**, 3361 (2000).
- 34 **Cyrille, M. C. S. Kim, M. E. Gómez, J. Santamaría, C. Leighton, Kannan M. Krishnan and Ivan K. Schuller,** *Phys. Rev. B* **62**, 15079 (2000).
- 35 **Ruehrig, M. R. Schaefer, A. Huber, R. Mosler, J.A. Wolf, S. Demokritov, and P. Gruenberg,** *Phys. Status Solidi A* **125**, 635 (1991).
- 36 **Valet T. and A. Fert,** *Phys. Rev. B* **48**, 7099 (1993).
- 37 **Ijiri, Y. J. J.** *Phys.: Condens. Matter.* **14** (2002) R947- R966.
- 38 **Campillo, G. L. F. Castro, P. Vivas, E. Baca, P. Prieto D. Arias, J. Santamaría, A. Berger, and S. D. Bader;** *Surface Review Letters* **9**, 1611-11615 (2002).
- 39 **O’Handley, R.** in *Modern Magnetic Materials* Wiley, New York, (2000).
- 40 **Moutis, N. et al.,** *Phys. Rev. B*, **64** (2001) 094429 and references therein.
- 41 **Prieto, P. M. E. Gómez, G Campillo, A. Berger, E. Baca, R. Escudero, F. Morales.** *Physica Status Solidi* **201** 2343-2346 (2004).
- 42 **Stiles M. D. et. al.,** *Physical Review B* **60**, 12 950 (1999); **59**, 3722 (1999).
- 43 **Berger, A. G. Campillo, P. Vivas, J. E. Pearson S. D. Bader, E. Baca and P. Prieto,** *Journal of Applied Physics* **91** 8393 (2002).
- 44 Comunicación personal J. Guimpel, N. Haberkorn, A. Condó, Centro Atómico de Bariloche y el Laboratorio de Microscopía Electrónica del CAB, Argentina (2005).
- 45 **Haberkorn, N. J. Guimpel, L. B. Steren, G. Campillo, W. Saldarriaga, and M. E. Gómez;** *Journal of Applied Physics* **94** (51) 3011-3014 (2003).
- 46 **Fullerton, E. E. I. K. Schuller, H. Vanderstraeten, and Y. Bruynseraede,** *Physical Review B* **45**, 9292 (1992).
- 47 **Peng, B. X. X. Zhang, Z. Xie, H. J. Tao, B. Xu, H. Liu, B. R. Zhao,** *Phys. Rev. B* **61** 8955 (2000).
- 48 **Mendoza, G. A. O. Guzmán, H. Ariza-Calderón, P. Prieto;** *Journal of Applied Physics*, **97** 10A507 (2005).
- 49 **Campillo, G. A. Hoffmann, M. E. Gómez, P. Prieto;** *Journal of Applied Physics* **97** 10K104 (2005); **M.E. Gómez, J. Santamaría, S. Kim, Kankan M. Krishnan, Ivan K. Schuller,** *Physical Review B* **71** 125410 (2005).

Recibido el 15 de noviembre de 2004

Aceptado para su publicación el 29 de junio de 2005

COHERENCIAS Y CORRELACIONES CUÁNTICAS EN MATERIA CONDENSADA

por

Luis Quiroga*

Resumen

Quiroga, L.: Coherencias y correlaciones cuánticas en materia condensada. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 411-416. 2005. ISSN 0370-3908.

La búsqueda de manifestaciones cuánticas coherentes a escala macroscópica es actualmente intensa. En especial, con la fabricación de nanoestructuras semiconductoras se ha podido llegar a un nivel de control tanto espacial como temporal donde esos efectos cuánticos asombrosos pudieran ser demostrados. En este artículo se presenta una revisión crítica de resultados recientes sobre la creación de estados cuánticos enredados en sistemas de puntos cuánticos, la observación de su decoherencia en escalas de tiempo del orden de picosegundos, así como también la transferencia de coherencias entre un estado cuántico macroscópico tipo condensado de Bose-Einstein y la luz que emite.

Palabras clave: Enredamiento; nanoestructuras semiconductoras; control coherente.

Abstract

The search for quantum coherent manifestations at a macroscopic length scale is intense nowadays. Specially, based on the fabrication of semiconductor nanostructures is now possible a level of space and time control with which those astonishing quantum effects could be demonstrated. In this paper a critical review on recent results concerning the generation of entangled states in quantum dot systems, the observation of their decoherence on a picosecond scale of time as well as the transfer of coherences from a quantum macroscopic state such as a Bose-Einstein condensate to the light it emits is presented.

Key words: Entanglement; semiconductor nanostructures; coherent control.

Comprender las propiedades del mundo que nos rodea desde el conocimiento básico de que todo objeto material está hecho de partículas (átomos) en perpetuo movimiento, ha sido uno de los mayores logros de la física del

siglo XX. Es así como la teoría que conecta el conjunto de leyes fundamentales de la dinámica y estructura de la materia a escala atómica, la denominada física cuántica, ha demostrado en los últimos 80 años una serie de éxitos

* Departamento de Física, Universidad de los Andes. A.A. 4976, Bogotá D.C.

sin precedentes en la historia de esta ciencia. Es una teoría ampliamente corroborada y en algunos casos con predicciones paradójicas o contra-intuitivas, aunque experimentalmente bien demostradas. El rango de fenómenos a los que ha sido aplicada esta teoría fundamental de la física es enorme. Inicialmente se desarrolló alrededor de los resultados de la espectroscopía atómica, de donde se pasó a comprender el mundo sub-atómico (física nuclear y de partículas) y el mundo supra-atómico (física molecular y del estado sólido). Muchas tecnologías modernas serían imposibles sin la física cuántica: basta recordar que todas las tecnologías informáticas actuales están basadas en el entendimiento cuántico de los semiconductores o que la fabricación de láseres descansa en el conocimiento de los procesos cuánticos elementales de la interacción de la radiación y la materia.

La física cuántica ha representado igualmente una nueva forma de ver el mundo donde las probabilidades, las incertidumbres y las superposiciones representan el conocimiento más profundo y exacto que podemos tener de un sistema físico. Esta nueva perspectiva ha abierto una puerta para entender y manipular la información a un nivel mucho más profundo. De una primera era donde el interés se centró en comprender y explicar las estructuras a nivel atómico estamos entrando en una segunda revolución donde el énfasis está en el control de las correlaciones espaciales y temporales que poseen los sistemas cuánticos. Muy recientemente se han logrado fabricar nanoestructuras de estado sólido que han permitido ampliar el rango de sistemas donde los efectos de las coherencias y correlaciones cuánticas pueden manifestarse a escalas meso- y macroscópica. La interacción de la luz con los sistemas materiales a distintas escalas de tamaño ha sido el elemento clave para comprender los secretos de la naturaleza. En este artículo se pasa revista a algunos de los hitos más importantes en esta búsqueda de efectos de coherencias cuánticas a escala macroscópica a la par que se sintetizan algunos resultados obtenidos por el autor y sus colaboradores en los últimos años, especialmente en el campo de las nanoestructuras semiconductoras en tres frentes: la generación de estados altamente enredados en sistemas de puntos cuánticos, la pérdida de coherencia cuántica en escalas de tiempo ultra-cortas y la transferencia de coherencias cuánticas entre la luz y sistemas de materia condensada.

El efecto de correlaciones cuánticas (o enredamiento, *entanglement*) en las propiedades estructurales y dinámicas de sistemas abiertos de muchas partículas es uno de los problemas que más atención atrae en la actualidad. El enredamiento cuántico es uno de los fenómenos más suti-

les e intrigantes en la naturaleza. A pesar de posibles paradojas que inicialmente se asociaron con el enredamiento cuántico hoy en día se ve como una fuente importante para el procesamiento cuántico de la información (PCI) con aplicaciones ya demostradas en teleportación cuántica, criptografía y codificación densa [Nielsen, 2000]. La física cuántica ha contribuido al desarrollo de la información clásica en al menos dos formas, que pueden ser denominadas evolucionaria y revolucionaria. En la etapa evolucionaria la teoría cuántica ha sido usada como una herramienta para aprovechar ciertas propiedades estructurales de dispositivos que van evolucionando siempre hacia escalas de dimensiones más reducidas. Por el contrario, en la etapa revolucionaria la física cuántica aporta nuevas y radicalmente diferentes formas de manipular la información en la medida en que en lugar de mejorar dispositivos ya existentes propone dispositivos que manejan la información de acuerdo con las leyes físicas más fundamentales. Podemos decir que estamos entrando en la era de la tecnología cuántica. El enredamiento, el paradigma de las correlaciones puramente cuánticas, es entonces un nuevo recurso que como magnitud física que es, admite ser cuantificado y transformado.

Sin embargo, el enredamiento cuántico es una propiedad muy frágil, que puede ser destruida por la interacción del sistema de interés con el medio. Este proceso de pérdida de enredamiento se ha denominado decoherencia. Este efecto es el principal obstáculo para el desarrollo práctico del PCI. En general, la decoherencia es un proceso muy rápido que depende esencialmente del tamaño y de la temperatura del sistema de interés, pero que también depende de otros factores como pueden ser una preparación imperfecta del estado cuántico y ruido en general. Además, es la decoherencia la responsable de la aparición de comportamientos clásicos en sistemas cuánticos. Un aspecto importante del grado de desarrollo que ha alcanzado la física actual es que se ha pasado del debate puramente filosófico sobre la frontera entre los mundos clásicos y cuánticos, a la planeación y ejecución de experimentos controlados con el fin de precisar esa frontera.

Existe un creciente interés por explorar las conexiones entre la teoría cuantitativa del enredamiento y las propiedades de sistemas de materia condensada [Leggett, 2002; Osborne, 2002]. Entre los problemas considerados hasta ahora deberían mencionarse aquellos relacionados con la conexión del enredamiento cuántico con el orden de largo alcance y la ruptura espontánea de simetría [Shi, 2003]. El enredamiento aparece en forma natural en física de materia condensada a baja temperatura. Es el responsable de muchos aspectos importantes en estos sistemas, tales como

correlaciones de largo alcance que caracterizan una transición de fase, pero es al mismo tiempo, su estructura complicada uno de los obstáculos más fuertes para estudios numéricos [Reslen, 2005]. Por lo tanto, es un problema muy importante en la actualidad, explorar estos sistemas donde el enredamiento se presenta en forma natural, con el propósito ya sea de manipularlo con fines de PCI o para ganar comprensión de mecanismos físicos que puedan ser usados para enredar un gran número de subsistemas cuánticos. Es importante también resaltar que desde el punto de vista de la física fundamental el estudio del enredamiento en sistemas de muchas partículas ofrece la oportunidad de explorar otros aspectos complementarios de la física tradicional de materia condensada, que permitan ganar en la comprensión de fenómenos cuánticos macroscópicos como la superconductividad, la superfluidez, efectos Hall cuánticos y transiciones de fase en general. Con respecto a este último tópico ha sido de interés revisar el concepto de universalidad entre distintos sistemas físicos que poseen leyes de escalamiento idénticas en cercanías de un punto crítico. El estudio de las leyes de escalamiento universal que sufre el enredamiento, como nueva magnitud física medible, ha sido demostrado por nosotros en el caso de dos sistemas aparentemente bien distintos: un sistema de materia y radiación en interacción por un lado y un sistema puramente magnético formado por partículas con spin [Reslen, 2005]. Este estudio permite anticipar que las distintas clases de universalidad bien establecidas en la física estadística de las transiciones de fase pueden presentar aspectos novedosos cuando el enredamiento deba ser tenido en cuenta. Por lo tanto, la noción de enredamiento cuántico en sistemas macroscópicos permite dar nueva luz a viejos problemas de transiciones de fase e investigar la frontera entre los mundos clásicos y cuánticos, así como posiblemente también pueda dar indicaciones sobre el proceso mismo de la medición cuántica.

Realizaciones concretas en materia condensada donde diversos aspectos del enredamiento cuántico han sido explorados tanto teórica como experimentalmente son los sistemas de puntos cuánticos (QDs) [Quiroga, 1999]. Un QD aislado es muy similar a un átomo individual, y experimentos similares pueden ser realizados en este sistema conveniente de materia condensada como los ya realizados en física atómica [Gammon, 2002]. Varios de estos experimentos han usado QDs ya sea del tipo auto-ensamblados o formados como islas en pozos cuánticos ultradelgados [Bonadeo, 1998; Heller, 1997; Gammon, 1997; Cundiff, 1996; Brown, 1996]. Como el tamaño de un QD es comparable con la longitud de onda de de Broglie de los portadores (electrones/huecos), sólo ciertos valores discretos de energía son permitidos. La ventaja de tener

una densidad discreta de estados se ve degradada por variaciones en los tamaños de los QDs que lleva a un ensanchamiento inhomogéneo de las líneas espectroscópicas. Para recuperar líneas espectrales homogéneas y angostas se debe aislar un QD. Esto ya se ha logrado con diferentes técnicas de micro-aperturas y excitaciones espacialmente selectivas. Con base en estos resultados experimentales se ha propuesto usar sistemas de dos y tres QDs acoplados entre sí por interacciones resonantes tipo Forster para generar en ellos, por medio de la excitación con luz coherente (láser), estados con máximo enredamiento como son los estados de Bell (2 QDs) y estados de Greenberger-Horne-Zeilinger (3 QDs) [Quiroga, 1999]. Esta propuesta inicial ha sido aceptada y ampliada por múltiples autores en años recientes [Biolatti, 2000; Nazir, 2004]. Entre las ventajas que tiene el usar estados altamente enredados en sistemas de materia condensada está la posibilidad de explotarlos no sólo con fines prácticos en criptografía y teleportación cuánticas, sino también de explorar los fundamentos de la teoría cuántica, como la violación de desigualdades de Bell y correlaciones GHZ, en sistemas altamente controlados y familiares como son los semiconductores.

Junto con los avances en la fabricación de QDs individuales, una nueva área de estudio se ha abierto con la inmersión de estos QDs en microcavidades semiconductoras. Localizar una pequeña cavidad óptica alrededor de un QD modifica la densidad de modos ópticos, cambiando de esta forma la rata y el patrón de emisión espontánea [Messin, 1999]. Para efectuar este cambio, se añade un par de reflectores distribuidos de Bragg alrededor de los QDs. Es posible también fabricar cavidades en forma de microdiscos que confinan los modos ópticos en las 3 dimensiones. Se tiene así, un sistema interactuante formado por pares electrón-hueco (excitones) y fotones confinados. En un régimen de débil acoplamiento entre radiación y materia, el principal fenómeno de interés es la modificación de la recombinación espontánea. En el régimen de fuerte acoplamiento ocurren fenómenos novedosos debido a la creación de nuevas excitaciones colectivas. Por medio de la interacción de excitones en QDs con el modo cuantizado de la radiación en la cavidad es posible manipular el estado cuántico del campo en la cavidad [Andrews, 1999; Andreani, 1999]. Se ha demostrado que iniciando con un campo vacío de fotones se puede preparar un estado arbitrario del campo con la interacción sucesiva con sistemas de dos niveles (excitones, por ejemplo). De igual manera el estado de la microcavidad puede determinar el tipo de enredamiento que se puede lograr entre los excitones en puntos cuánticos. Los QDs deberían prepararse inicialmente en una superposición adecuada de estados a cero y un

excitón, antes de que interactúen con el campo. Es posible generalizar esta idea a complejos excitónicos más realistas con más de dos estados. En las referencias [Olaya-Castro, 2004; Olaya-Castro, 2004] se demuestra el tipo de acción catalítica que una microcavidad puede jugar para acelerar la creación de enredamiento entre sistemas de dos niveles (átomos, iones, excitones en puntos cuánticos, SQUIDS superconductores). Si inicialmente se tiene cero fotones en la cavidad al final del proceso el estado de la radiación confinada queda inalterado. Todo el efecto de la microcavidad se ha reducido a permitir el enredamiento entre los sistemas materiales en interacción con ella.

Las coherencias cuánticas son de muy corta vida. En nanoestructuras semiconductoras el tiempo de decoherencia de excitones es del orden de decenas de picosegundos (10^{-12} segundos). En espectroscopía de QDs individuales, han sido medidos tiempos de decoherencia de 40 picosegundos, lo que permite el control conveniente de estos sistemas con pulsos ópticos de sólo unos cuantos femtosegundos (10^{-15} segundos), una técnica denominada espectroscopía ultrarápida. Entre las varias oportunidades que este tipo de espectroscopía brinda, una de ellas es la de disponer de QDs como unidades lógicas básicas para PCI. En este régimen ultrarápido, la duración finita de un evento de dispersión lleva necesariamente a comportamientos cualitativamente nuevos: la dinámica es No-Markoviana (efectos de memoria son importantes), los procesos de dispersión no se pueden considerar como irreversibles y la conservación de la energía en procesos individuales es violada debido a incertidumbres energía-tiempo. Estudios sobre efectos híbridos de decoherencia o disipación junto con efectos de memoria en la dinámica ultrarápida en nanoestructuras semiconductoras han sido señalados en [Rodríguez, 2002; Quiroga, 2004 y Reyes, 2004] donde se presentan resultados que muestran los efectos de correlaciones inter-partículas como excitones y biexcitones en puntos cuánticos y su decaimiento en una escala de decenas de picosegundos teniendo en cuenta una dinámica coherente ultrarápida con efectos de memoria (efectos no-Markovianos). Se demostró que las técnicas usuales para trabajar estos fenómenos en términos de un único tiempo característico de decaimiento (aproximación Markoviana) y aproximaciones de campo medio, son incapaces de detectar los efectos debidos a superposiciones cuánticas en tiempos muy cortos, y que aún más, tienden a sobrevalorar los efectos de la decoherencia. La respuesta fluorescente del sistema de QDs es igualmente sensible, en el régimen no-Markoviano, al estado inicial de preparación de los QDS, permitiendo de esta forma acceder a una magnitud física que sirva de diagnóstico o testigo de la posible existencia

previa de superposiciones o enredamiento [Rodríguez, 2002]. La manipulación de estos estados colectivos con haces ultra-cortos de luz láser permitirá proponer regímenes de parámetros realistas donde la generación de enredamiento cuántico en nanoestructuras semiconductoras y microcavidades sea factible.

Estas nuevas formas de espectroscopía están siendo igualmente explotadas en el estudio de excitones y polaritones (estados superpuestos de excitones y fotones) en nanoestructuras y microcavidades semiconductoras. A bajas densidades, se espera que los excitones o polaritones se comporten de acuerdo con la estadística de Bose-Einstein. La condensación de Bose-Einstein es uno de los fenómenos colectivos más asombrosos en física. Cuando un conjunto de bosones se lleva a temperaturas por debajo de la denominada temperatura crítica, un número macroscópico de ellos ocupará simultáneamente un mismo estado individual. Este fenómeno, asociado a una ruptura espontánea de simetría, lleva a otro no menos asombroso: la superfluidez [Stamer-Kurn, 1998]. Efectos bosónicos similares ocurren en sistemas de excitones y polaritones. Dado que estos últimos están formados por excitones y fotones, y los excitones terminan convirtiéndose en luz, un condensado de polaritones corresponde finalmente a un estado coherente de energía óptica. Pero debido a que los polaritones tienen una masa finita, ellos se mueven mucho más lentamente que los fotones, y se condensan a muy bajas temperaturas en un estado coherente. Una forma de observar este condensado es buscar señales que correspondan a la coherencia óptica de la luz emitida [Olaya-Castro, 2001; Quiroga, 2002; Olaya-Castro, 2003]. Se demostró en estas investigaciones que a tiempos del orden de femtosegundos la luz emitida por el condensado guarda memoria de la coherencia propia del sistema condensado, y por lo tanto esta característica puede ser utilizada como un indicador de una fase coherente macroscópica de la materia excitónica en semiconductores. Igualmente se ha encontrado en este tipo de estudios que la luz emitida posee características no-clásicas como la de estar "comprimida" (*squeezed*) en una de sus cuadraturas. Este resultado permitirá usar los sistemas de condensados en semiconductores como elementos fundamentales en la detección de señales muy débiles por debajo del límite de Heisenberg.

En este artículo se ha evitado toda discusión de manifestaciones cuánticas en superconductores, materiales muy importantes tanto por razones tecnológicas como por sus propiedades físicas intrínsecas sorprendentes. Tampoco se ha entrado en consideraciones sobre la importancia de los sistemas superconductores para explorar posibles lí-

mites macroscópicos de validez de la física cuántica [Leggett, 2002]. En cualquier tipo de sistema de materia condensada que se considere será interesante en el futuro ver experimentos donde se manifiesten claramente las correlaciones cuánticas en objetos de tamaños cada vez más grandes. Todos estos tópicos, muy importantes, interesantes y en activo desarrollo, permitirán eventualmente manipular en forma controlada las coherencias cuánticas en el mundo macroscópico. De las anteriores consideraciones, es claro que para controlar coherencias cuánticas en la vida real o cotidiana, se debe emprender una acción multidisciplinaria entre distintas áreas de la física moderna que han permanecido en desarrollo independiente hasta ahora: se requieren conocimientos y técnicas provenientes de varios campos que combinen esencialmente herramientas de la física mesoscópica de la materia condensada con aquellas propias de la óptica cuántica. Precisamente con esta idea de integrar conocimientos de distintas áreas de la física se ha centrado el autor en la investigación de los fenómenos coherentes en sistemas de materia condensada en unión con fuentes cuánticas de luz, donde, dado que cualquier coherencia cuántica es transitoria, es muy interesante estudiar el proceso dinámico de la decoherencia que ocurre en tales nanoestructuras fotónicas. Es este un tema que atrae actualmente un gran interés a nivel mundial tanto por la física fundamental que contiene como por las aplicaciones prácticas concretas.

Las aplicaciones, reales y potenciales, de estos nuevos campos están hoy en día en todas partes. El desarrollo conjunto de la electrónica y la fotónica puede revolucionar la tecnología como lo hizo hace más de 50 años el transistor. Los láseres semiconductores y las fibras ópticas son hoy en día las dos principales tecnologías de la revolución en telecomunicaciones, y el desarrollo de técnicas experimentales en la práctica médica y en otras áreas tecnológicas no ha dejado de crecer. Nuevas formas del tratamiento de la información están surgiendo, donde aspectos cuánticos fundamentales de las nanoestructuras semiconductoras como su capacidad de enredamiento controlado, estabilidad a tiempos muy cortos, interfaces con fotones individuales, entre otras posibilidades, podrían ser explotados en protocolos de criptografía cuántica en sistemas de estado sólido. De igual manera se espera que la capacidad de miniaturización de los sistemas semiconductores abra en un futuro cercano la posibilidad de un gran nivel de escalamiento de dispositivos cuánticos para ensamblar compuertas lógicas cuánticas y por qué no, enfrentar exitosamente el gran reto actual, como es la construcción de un computador cuántico. Es por lo tanto un camino que sin duda estará lleno de sorpresas pero también de promesas hechas realidad, el que espera a los

científicos dedicados a la investigación de las manifestaciones de las coherencias cuánticas a escala macroscópica.

Los resultados comentados en este artículo no habrían sido posibles sin la colaboración a lo largo de muchos años con los colegas y amigos Ferney J. Rodríguez, Neil F. Johnson y Carlos Tejedor. Igualmente debo mucho a aquellos estudiantes que se han arriesgado a hacer sus trabajos de tesis conmigo, en especial a Alexandra Olaya-Castro, Jorge Villalobos, José Reslen, Iván Zalamea, Álvaro Pedraza y Claudia Ojeda, entre otros.

Bibliografía

- Andreani L.C., G. Panzarini & J.-M. Gerard, 1999. Strong-coupling regime for quantum boxes in pillar microcavities: theory, *Phys. Rev.* **B60**: 13276-13279.
- Andrews J.T., P. Sen & R.R. Puri, 1999. Optical absorption spectra of a quantum dot in a microcavity, *J. Phys.: Cond. Matter* **11**: 6287-6300.
- Biolatti E., R.C. Iotti, P. Zanardi & F. Rossi, 2000. Quantum-information processing with semiconductor macroatoms, *Phys. Rev. Lett.* **85**: 5647-5650.
- Bonadeo N.H., J. Erland, D. Gammon, D. Park, D.S. Katzer & D.G. Steel, 1998. Coherent optical control of the quantum state of a single quantum dot, *Science* **282**: 1473-1476.
- Brown S.W., T.A. Kennedy, D. Gammon & E.S. Snow, 1996. Spectrally resolved overhauser shifts in single GaAs/AlGaAs quantum dots, *Phys. Rev.* **B54**: R17339-R17342.
- Cundiff S.T., M. Koch, W.H. Knox, J. Shah & W. Stolz, 1996. Optical coherence in semiconductors: strong emission mediated by nondegenerate interactions, *Phys. Rev. Lett* **77**: 1107-1110.
- Gammon D., S.W. Brown, E.S. Snow, T.A. Kennedy, D.S. Katzer & D. Park, 1997. Nuclear spectroscopy in single quantum dots: nanoscopic raman scattering and nuclear magnetic resonance, *Science* **277**: 85-88.
- _____ & D.G. Steel, 2002. Optical studies of single quantum dots, *physics today* **55**(10): 36-41.
- Heller W. & U. Bockelmann, 1997. Magneto-optical studies of a single quantum dot: excited states and spin flip of excitons, *Phys. Rev.* **B55**: R4871-R4874.
- Leggett, A.J., 2002. Testing the limits of quantum mechanics: motivation, state of play, prospects, *J.Phys.: Cond. Matter* **14**: R415-R451.
- Messin G., J. Ph. Karr, H. Eleuch, J.M. Courty & E. Giacobino, 1999. Squeezed states and the quantum noise of light in semiconductor microcavities, *J. Phys.: Cond. Matter* **11**: 6069-6078.
- Nazir A., B.W. Lovett, S.D. Barrett, T.P. Spiller & G.A.D. Briggs, 2004. Selective spin coupling through a single exciton, *Phys. Rev. Lett.* **93**: 150502 (4 pages).
- Nielsen M.A. & I.L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).

- Olaya-Castro A., F.J. Rodríguez, L. Quiroga & C. Tejedor**, 2001. Restrictions on the coherence of the ultrafast emission from an electron-hole pairs condensate, *Phys. Rev. Lett.* **87**: 246403 (4 pages).
- , **L. Quiroga & C. Tejedor**, 2003. Coherence properties of a radiating electron-hole condensate, *Solid State Commun.* **127**, 141.
- , **N.F. Johnson & L. Quiroga**, 2004. Dynamics of quantum correlations and linear entropy in a multi-qubit-cavity system, *J. Optics B: Quantum and Semiclass. Optics* **6**: S730-S735.
- , **N.F. Johnson & L. Quiroga**, 2004. Scheme for on-resonance generation of entanglement in a time-dependent asymmetric two-qubit-cavity system, *Phys. Rev.* **A70**, R020301 (4 pages).
- Osborne T.J. & M.A. Nielsen**, 2002. Entanglement in a simple quantum phase transition, *Phys. Rev.* **A66**, 032110 (14 pages).
- Quiroga L. & N.F. Johnson**, 1999. Entangled bell and ghz states of excitons in coupled quantum dots, *Phys. Rev. Lett.* **83**: 2270-2273.
- , **A. Olaya-Castro, F.J. Rodríguez & C. Tejedor**. 2002. Ultrafast optical coherence transfer from an electron-hole-pair condensate, *Proceedings of the ICPS-26, Edinburgh, UK.*
- , **F.J. Rodríguez & N.F. Jonson**, 2004. Non-markovian signatures of quantum superposition states in a nanostructure, *Microelectronics Journal* **35**: 95-96.
- Reslen, J., L. Quiroga & N.F. Johnson**, 2005. Direct equivalence between quantum phase transition phenomena in radiation-matter and magnetic systems: scaling of entanglement, *Europhysics Letters* **69**: 8-14.
- Reyes A., F.J. Rodríguez & L. Quiroga**, 2004. Ultrafast non-linear optical signal from a single quantum dot: exciton and biexciton effects, *Journal of Physics: Condensed Matter* **16**: 6185-6193.
- F.J. Rodríguez, L. Quiroga & N.F. Johnson**, 2002. Ultrafast optical signature of quantum superpositions in a nanostructure, *Physical Review* **B66**, 161302Rapid Communication (4 pages).
- Shi Y.**, 2003. Quantum disentanglement in long-range orders and spontaneous symmetry breaking, *Phys. Lett.* **A309**: 254-261.
- Stamper-Kurn D.M., M.R. Andre'**

Recibido el 7 de febrero de 2005

Aceptado para su publicación el 4 de abril de 2005

¿EN QUÉ SENTIDO PUEDE HABLARSE DE DIÁLOGO DE LAS CIENCIAS? ACERCA DE LAS NUEVAS CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

por

Carlos Eduardo Maldonado¹

Resumen

Maldonado, C.E.: ¿En qué sentido puede hablarse de diálogo de las ciencias? Acerca de las nuevas ciencias de la complejidad. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 417-428. 2005. ISSN 0370-3908.

Es efectivamente posible y necesario el diálogo entre las ciencias físicas, exactas y naturales y las ciencias sociales y humanas. El lugar en el que este diálogo es efectivamente fructífero es en el espacio constituido por las nuevas ciencias de la complejidad. Pero, con el estudio de los sistemas complejos, el propio estatuto tradicional de las ciencias cambia drásticamente.

Palabras clave: Prigogine, historia de la ciencia, filosofía de la ciencia, sistemas complejos, no-linealidad, ciencia y cultura.

Abstract

A dialogue between the exact, (the physical and the natural sciences) and the social and human sciences is both possible and necessary. The place where such a dialogue is truly prosperous is the one of the new science of complexity. However, with the study of complex systems, the very traditional status of the sciences changes dramatically.

Key words: Prigogine, history of science, philosophy of science, complex systems, nonlinearity, science and culture.

Introducción

Desde diversos caminos y con intereses diferentes se habla, con tono cada vez más fuerte, acerca del diálogo de

las ciencias. De un lado, están los llamados denodados por la búsqueda de una síntesis, cuyo último y quizás más afortunado esfuerzo es el de **Wilson** (1998). De otra parte, sin embargo, se habla del surgimiento de ciencias de frontera a

¹ Ph. D. en Filosofía. Profesor-Investigador Centro de Investigaciones y Proyectos Especiales (CIPE), Facultad de Finanzas, Gobierno y Relaciones Internacionales, Universidad Externado de Colombia. cmaldonado@uexternado.edu.co

partir de la identificación de, y el trabajo con, problemas de frontera. Exactamente en esta dirección emerge el estudio de los sistemas complejos adaptativos, cuyo *motto* genérico es conocido como las nuevas ciencias de la complejidad. Este trabajo trata del modo como cabe hablar, en propiedad, de diálogo de las ciencias entre sí y sostiene la tesis de que este diálogo sucede en dirección al estudio de los sistemas complejos. Tres momentos marcan la estructura que contiene a esta tesis. En primer lugar, se elabora una caracterización de los sistemas complejos, su lógica, heurística, dominios y problemas. Posteriormente, se presenta un cuadro con las propiedades de los sistemas complejos, a partir del cual, en tercer lugar, se precisa que el diálogo entre las ciencias naturales, exactas y naturales con las ciencias sociales y humanas no solamente es deseable y posible, sino necesario e inevitable, pero que este diálogo transforma los estatutos al mismo tiempo lógicos, filosóficos, sociales y culturales de las ciencias. No en última instancia, el tema es filosófico.

El estudio de los sistemas complejos

El tema del diálogo de las ciencias ha sido, de alguna manera, recurrente, con movimientos pendulares, en la historia de la modernidad hasta nuestros días. En la historia de la ciencia, diversos autores han trabajado en esta dirección y han llamado fuertemente la atención en este sentido. Cabe destacar, así, los nombres y trabajos de J. D. **Bernal** o A. **Koyré**. La sociología del conocimiento ya desde la obra pionera de Th. **Merton** apuntó en la misma dirección. Y desde luego no cabe desconocer la explícita provocación de C. P. **Snow** a propósito de la idea de “las dos culturas”, la científica y la de las humanidades. Por diversas circunstancias que son el objeto al mismo tiempo de la historia de la ciencia, la filosofía de la ciencia, la sociología del conocimiento, e incluso la antropología cultural, y más recientemente por parte de los estudios culturales sobre ciencia, tecnología y sociedad (CTS), es en el curso del siglo XX cuando el acento y el tono de dicho diálogo adquiere matices significativos por novedosos. Existe, sin embargo, un factor determinante en la transformación de las relaciones entre las ciencias, así como de las ciencias con el conjunto de la sociedad y de la cultura. Se trata, sin lugar a dudas, del surgimiento de las nuevas ciencias de la complejidad. Son numerosos los autores, diversos los temas y problemas constitutivos del estudio de los sistemas complejos.

No existe una única comprensión ni definición de la complejidad, y las comprensiones varían de un autor a otro. Por esta razón, a fin de estudiar el modo como surge el estudio de los sistemas complejos, y la comprensión de lo que son, vale la pena adoptar aquí como hilo conductor los

principales desarrollos del pensamiento y la obra de **Prigogine**. Desde aquí, será posible no solamente elaborar un cuadro (breve) de conceptos y problemas de las nuevas ciencias de la complejidad, sino, además y principalmente, mostrar a la vez el objetivo y la tesis de este artículo.

El surgimiento de nuevos paradigmas es un fenómeno lento e incierto en las comunidades académicas y científicas al igual que en el desarrollo de la sociedad en general, y tiene como principal dificultad social y cultural la constitución de nuevos lenguajes, relativamente a aquellos “vehiculados” y que se plasman en la ciencia normal y, hasta cierto punto, en la vida cotidiana de los seres humanos. Pues bien, **Prigogine** al mismo tiempo que lleva a cabo la constitución de un nuevo paradigma con inmensas consecuencias en varios órdenes, elabora, concomitantemente, un nuevo lenguaje.

Es sabido cómo el estudio de los sistemas de complejidad creciente tanto gira, como se condensa, en conceptos tales como estructuras disipativas, autoorganización, irreversibilidad de la flecha del tiempo, fluctuaciones, inestabilidades, y otros semejantes. Pues bien, puede decirse que la obra de **Prigogine** cumple la función generadora o catalizadora, por así decir, de estos y otros conceptos análogos.

Formulada y desarrollada por I. **Prigogine** puntualmente en 1962, la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio es el *locus* en donde brotan y confluyen los conceptos de las nuevas ciencias de la complejidad. La primera de las ciencias de la complejidad es la termodinámica del no-equilibrio (**Margulis**, 1998). Mejor aún, la termodinámica del no-equilibrio es la forma más genérica de designar el estudio de los sistemas complejos, los fenómenos complejos, en fin, los sistemas complejos adaptativos (SCA).

Es posible decir sin ambages que la termodinámica del no-equilibrio está articulada, en la obra de **Prigogine**, en torno a tres conceptos: la irreversibilidad, las estructuras disipativas y la importancia y el carácter mismo del tiempo, gracias a los cuales se expresa su pensamiento central: el orden tiene lugar a través de fluctuaciones. Quisiera sugerir a continuación una aproximación sintética a estos tres conceptos.

La primera idea fuerte que define al pensamiento de **Prigogine** es la de irreversibilidad, una idea que formula ya desde su tesis doctoral, presentada en 1945 con el título: *Étude Thermodynamique des Phénomènes Irreversibles*. A partir de esta idea, todo el trabajo de **Prigogine** desembocará, veinte años más tarde, en el concepto de estructura

disipativa, formulado en un artículo de 1967 con el título “Estructura, Disipación y Vida”². La distinción entre estructuras conservativas y estructuras disipativas puede rastrearse ya desde el libro escrito conjuntamente con **Glansdorff** en 1971 con el título: *Structure, Stability and Fluctuations*. Sin embargo, la irreversibilidad fue descubierta por primera vez a partir de los estudios de **Carnot** sobre la máquina de vapor. Sería medio siglo más tarde cuando en el esfuerzo por formularla en ecuaciones diferenciales se desarrollan las ecuaciones de estado. Los pioneros del trabajo de **Prigogine** son L. **Onsager** y Th. **De Donder** (**Kondepudi, Prigogine**, 1998).

La irreversibilidad constituye, sin duda alguna, el núcleo de la nueva termodinámica, la cual tiene el mérito de revelarnos que los sistemas dinámicos se encuentran lejos del equilibrio, y que por ello mismo son capaces de remontar la flecha del tiempo de la termodinámica clásica la cual conducía hacia la muerte o, lo que es equivalente, al equilibrio. Precisamente debido a la flecha del tiempo, el conocimiento humano descubre la imposibilidad o la incapacidad de predecir el futuro de un sistema complejo (esta, como es sabido, será una de las ideas directrices del caos - teoría o ciencia). En otras palabras, la flecha del tiempo pone de manifiesto que la estructura del tiempo es cada vez más compleja. De esta suerte, la irreversibilidad nos pone de frente, por primera vez, con procesos o fenómenos de complejidad creciente.

Los sistemas en equilibrio sólo perciben entornos inmediatos, pues, finalmente, es irrelevante que vean o puedan ver más allá de la proximidad –vecindazgo–, puesto que por definición en un sistema en equilibrio –esto es, en un sistema cerrado–, el horizonte lejano coincide con el entorno cercano o, inversamente, el entorno inmediato contiene el horizonte, puesto que no hay nada más allá que no coincida, punto por punto, con el entorno inmediato. Otra cosa sucede en los sistemas alejados del equilibrio.

En verdad, en los sistemas lejanos del equilibrio existen señales que recorren todo el sistema y que provienen de lugares lejanos; de este modo, los sistemas se hacen sensibles a estas señales, y dicha sensibilidad imprime dinámica a estos sistemas. En otras palabras, los sistemas alejados del equilibrio son altamente sensibles a las novedades o a las innovaciones, a los eventos (*events*), o al azar. Pues son estas novedades las que generan dinámicas no-lineales en dichos sistemas.

En 1977 **Prigogine** recibe el Premio Nóbel de Química, y publica en el mismo año el que es considerado su libro más importante: *Autoorganización en los sistemas de no-equilibrio*, escrito conjuntamente con G. **Nicholis** (con quien escribirá posteriormente *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*)³.

En la conferencia que dicta **Prigogine** ante la Academia de Ciencias con motivo de la recepción del Premio Nóbel, con el título “Tiempo, estructura y fluctuaciones” puede leerse de manera puntual en qué consiste su máxima contribución, y cómo, en consecuencia, puede decirse que la termodinámica del no-equilibrio es la primera de las ciencias de la complejidad.

En rigor, el aporte fundamental de **Prigogine** y por lo cual recibió el Premio Nóbel no es tanto el haber descubierto la irreversibilidad, sino el haber desarrollado una formulación matemática de los procesos irreversibles que permitió tratarlos en esta forma.

El no-equilibrio es el origen del orden (1977: 1.2.). Dice **Prigogine**: “Es interesante el que la bifurcación introduzca en un sentido la ‘historia’ en la física... De este modo, introducimos en la física y la química un elemento ‘histórico’, el cual hasta ahora parecía reservado tan sólo a las ciencias que tratan con fenómenos biológicos, sociales y culturales” (*ibid*: 4.6.)⁴. Esto significa dos cosas.

2 Que existen claras interdependencias entre la ciencia y la propia biografía es algo suficientemente conocido ya desde vías distintas; así por ejemplo, tanto desde el psicoanálisis como desde la psicología del descubrimiento científico. Pues bien, en el caso de Prigogine algo semejante puede verse sin dificultad. Para un cuadro a partir del cual cabe inferir sin dificultades los entrelazamientos, nunca enteramente consciente ni explícitamente manifiestos entre la propia biografía –esto es, la vida propia–, y el pensamiento científico y filosófico de Prigogine, véase la hermosa entrevista con Ottavia Bassitti y que da lugar al libro: *El nacimiento del tiempo*, Barcelona, Tusquets, 1993. Sin embargo, más exactamente, el tema clave es aquí el del entrelazamiento entre tres factores: el biográfico, el cultural, en el sentido amplio de la palabra, y el de la propia teoría científica constituía por determinados problemas, en el sentido lógico y heurístico de la palabra. La armonía entre estos tres factores es altamente sensible.

Siguiendo la misma línea de relación entre biografía, cultura y desarrollo de una teoría, M. Waldrop (1992) muestra la misma tendencia con relación a varios de los teóricos fundadores del Instituto Santa Fe, tales como C. Langton, P. Anderson, S. Kauffman o G. Cowan, entre otros.

3 El título del original en alemán es: *La investigación de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias naturales (Die Erforschung des Komplexen. Auf dem Weg zu einem neuen Verständnis der Naturwissenschaften)*.

4 “It is interesting that bifurcation introduces in a sense ‘history’ into physics... In this way we introduce in physics and chemistry a ‘historical’ element, which until now seemed to be reserved only for sciences dealing with biological, social, and cultural phenomena”.

De un lado, es el hecho de que la distancia entre las llamadas ciencias duras y las ciencias blandas desaparece o por lo menos disminuye, produciéndose un acercamiento en algún lugar intermedio del que brotan o en el confluyen tanto lo simple como lo complejo. De otra parte, al mismo tiempo, asistimos, mediante esta metamorfosis de las ciencias, a la emergencia de una síntesis novedosa del conocimiento. Por consiguiente, cabe decir sin dificultad que la complejidad se caracteriza como una nueva forma de racionalidad, a saber: como una síntesis de lo diverso y anteriormente contrapuesto. Pero, a su vez, es una síntesis que es más que la sumatoria de las partes. Las ciencias anteriores se transforman en el encuentro, y de esa transformación surge un nuevo lenguaje, nuevas aproximaciones, nuevos y distintos métodos, en fin, un nuevo mundo y una nueva realidad. Se trata del universo de los sistemas complejos no-lineales, mediante el cual es posible comprender, por primera vez, que los fenómenos simples o regulares, que las predicciones y que la causalidad, por ejemplo, son tan sólo casos particulares dentro del dominio, bastante más amplio de los sistemas, fenómenos o comportamientos caracterizados como alejados del equilibrio, esto es, complejos.

La tercera idea fuerte del pensamiento de **Prigogine** tiene que ver con el tiempo. Dos han sido las comprensiones clásicas acerca del tiempo, y ambas al mismo tiempo se han fundado en la física y han dado lugar a sendas comprensiones culturales y por tanto a formas sociales de vida. De un lado, está la comprensión más antigua y a la vez más sólida, que afirma que el tiempo es o implica pérdida, olvido, desgaste, en fin, disipación. Ciertamente que la expresión más reciente e inteligente de esta versión es la de la termodinámica clásica, pero es igualmente cierto que esta es la comprensión que ha constituido a toda la cultura judeo-cristiana. El tiempo es un problema en el sentido de obstáculo; en una palabra, el tiempo resta, y no suma. De otra parte, al mismo tiempo, se encuentra la tesis que sostiene que el tiempo es una ilusión. La expresión fuerte, reciente e inteligente de esta posición se encuentra en **Einstein**. Sin embargo, varios notables filósofos y pensadores han sostenido una tesis semejante. Seguramente las dos fuentes clásicas son **Aristóteles**, en el mundo griego, y **E. Husserl** a comienzos del siglo XX. La forma en la que el tiempo aparece como una ilusión consiste en el énfasis por, o la preocupación en, el ahora, o el instante, frente al cual, todo lo demás es justamente ilusión. Cabe decir que las dos tesis clásicas del tiempo coinciden y se refuerzan en un mismo punto, a saber: en la afirmación, abierta o tácita, de que nos encontramos en, o nos la vemos con, un sistema cerrado.

Frente a estas dos grandes y dominantes comprensiones del tiempo, **Prigogine** produce una tesis verdaderamente innovadora. El tiempo no es ni implica desgaste ni ilusión. Por el contrario, el tiempo es, e implica, creación. Precisamente por ello, la evolución de la complejidad es hacia un proceso creciente. El tiempo depende de la vida misma, y la vida misma es un proceso incesante y continuado de complejidad creciente. Justamente, debido a la ruptura de la simetría temporal es que se producen bifurcaciones, fluctuaciones, en fin inestabilidades, todas las cuales son generadoras de procesos. La generación de nuevos e incesantes procesos es la obra misma de la autoorganización. De esta suerte, tiempo y autoorganización son fenómenos concomitantes, y marcan de manera definitiva a este tipo de fenómenos, sistemas y procesos conocidos como complejos, es decir, de complejidad creciente.

En 1979 **Prigogine** escribe conjuntamente con **I. Stengers** *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, libro que quiere constituirse como el más importante de cara al diálogo del científico con la sociedad en general. Esto es, como libro de divulgación. Sin embargo, es preciso decir que de la primera edición (1979) a la segunda (1990), un giro sensible se produce en la intención de **Prigogine** y **Stengers**, en el sentido de que buscan hacer de un libro de divulgación un libro de producción de conocimiento. Esta intención es particularmente clara en la introducción y sobre todo en los apéndices que escriben para la segunda edición. Hay una circunstancia particular mediadora entre el carácter del libro entre la primera y la segunda edición, a saber: ha surgido en el mundo y se consolidado un novedoso campo de conocimiento: las ciencias de la complejidad. De suerte que lo que en un primer momento quiere ser una divulgación de la termodinámica del no-equilibrio, se convierte en un segundo momento en un esfuerzo de desarrollo más sistemático frente a la acogida y los desarrollos que, a partir de la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio, llevan a cabo teóricos e investigadores con diferentes formaciones profesionales. En la obra de **Prigogine**, *La nueva alianza* se encuentra en el centro, como puente, por así decir, entre dos textos fundamentales para entender el pensamiento de **Prigogine**. Hacia atrás, se trata del libro *Autoorganización en los sistemas de no-equilibrio*, de 1977, y hacia delante, del libro *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*, de 1987. Ambos libros fueron escritos por **Prigogine** conjuntamente con **G. Nicholis**.

Una palabra acerca de *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. En 1970 **J. Monod** –ganador del Premio

Nóbel en Biología en 1965– escribe *El azar y la necesidad*. Este libro marcó un hito en la historia del pensamiento biológico, así como en la filosofía de la biología⁵. En una conversación con O. Bassetti, Prigogine confiesa que dos textos han marcado todo su pensamiento⁶. Se trata del libro clásico de E. Schrödinger, *¿Qué es la vida?*, y del libro de Monod mencionado. Pues bien, puede decirse que *La nueva alianza* es el debate con, y la respuesta a, estos dos textos. Existen numerosos testimonios y declaraciones en este sentido en diversos trabajos de Prigogine y bastaría con cotejar los tres textos para verificar que así es efectivamente.

La vida es el fenómeno por excelencia de la irreversibilidad. Mejor, la vida es un fenómeno irreversible, lo cual, sin embargo, no debe entenderse en el sentido de que los eventos o procesos de la vida sean todos irreversibles. Precisamente en esta idea se encuentra el núcleo de las relaciones entre el azar y la necesidad. En efecto, antes que una oposición, como lo quiere ver Monod, el azar y la necesidad se entrecruzan y contribuyen a la dinámica misma de la vida.

La nueva alianza tiene dos expresiones, así: de un lado, se trata de una nueva relación entre el ser humano y la naturaleza y, de otra parte, de una redefinición de las relaciones entre las ciencias sociales y humanas y las ciencias básicas y exactas, o también, en términos más generales, entre la ciencia y la filosofía. No hay que olvidar una parte de las palabras que recibió Prigogine en la ceremonia de entrega del Premio Nóbel: “Sus trabajos en física contienen sugerentes consecuencias en otros dominios del pensamiento”. En términos más radicales: se trata de aprovechar la ciencia y la filosofía para comprender y hacer posible la vida y la cultura. A Prigogine (como a nosotros) poco le importa tal o cual conocimiento, pues no son otra cosa que herramientas, para aquello que es fin en sí mismo: la vida misma.

La nueva alianza se compone de tres libros, así: “El espejismo de lo universal: la ciencia clásica”, en la que Prigogine y Stengers elaboran un fresco sobre la ciencia

clásica, esto es, moderna, y cómo ésta desemboca en la división de dos culturas, la científica y la humanista, debido a un problema: la ciencia clásica nos revela que la física y la biología son opuestas y extrínsecas la una a la otra, lo cual nos deja ante un lacónico resultado: la vida no tiene cabida ni explicación en la imagen clásica del mundo, dejándonos así en una absoluta soledad en el universo. El lugar en el que esta afirmación se expresa y condensa mejor es en el libro mencionado de Monod. En otras palabras, las dos culturas se condensan, cada una, en dos conceptos contrapuestos o antagónicos: el azar y la necesidad. La lectura de estos dos conceptos corresponde, por tanto, a la escisión: o azar, o necesidad. El carácter determinista de la ciencia moderna se condensa, así, en el libro de Monod.

El segundo libro se llama: “la ciencia de la complejidad”. Como cabe recordar, el problema constitutivo de las ciencias de la complejidad consiste en explicar el orden. Pues bien, el orden se origina siempre luego de una inestabilidad, y está determinado por tanto por la fluctuación de más rápido desarrollo. Esta idea conduce a Prigogine a una de las conclusiones más novedosas y radicales y ya elaborada desde sus primeros trabajos: el orden sucede por fluctuaciones. En otras palabras, no es cierto que el orden suceda a pesar de las fluctuaciones, en contra de las mismas o incluso después de las mismas. Por el contrario, el orden, que es constitutivo de complejidad creciente, es el resultado de la interacción entre el azar y la necesidad. Es inevitable aquí observar que, en contraste con la segunda de las ciencias de la complejidad –a saber, la ciencia del caos–, el orden no tiene lugar a partir del caos⁷.

El tercer libro –“Del ser al devenir”–, tiene como finalidad mostrar que es necesaria una síntesis entre lo simple y lo complejo, y que dicha síntesis sucede en la dirección de un abandono de cualquier pretensión de comprensión y explicación de la realidad en sentido objetivo u objetivista, natural o positivo, en fin, cierto y verdadero sin más. Como lo dirá Prigogine posteriormente en otro texto, el estudio

5 Una observación marginal. Monod recibe el Premio Nobel de Medicina en 1965 conjuntamente con F. Jacob y A. Lwoff, gracias precisamente a una colaboración estrecha entre ambos. Sin embargo, debido puntualmente al libro de Monod *El azar y la necesidad*, se producirá muy pronto un alejamiento entre Monod y Jacob. Este distanciamiento se encuentra registrado teóricamente en un libro de Jacob: *El juego de lo posible. Ensayo sobre la diversidad de los seres vivos*, Barcelona, Grijalbo, 1982 (edición original en francés de 1981). – Cabe anotar una circunstancia análoga a las relaciones entre H. Maturana y F. Varela, e incluso un paralelismo en el siguiente sentido: las tesis de Monod y de Maturana se corresponden como contraposición a las de Jacob y Varela, naturalmente guardadas proporciones.

6 Cfr. *El nacimiento del tiempo*, op. Cit., págs. 33 y 34.

7 Quiero con esto tomar distancia de la forma como se traduce *La nueva alianza*, al inglés: *Order out of Chaos. Man's Dialogue of Nature*, New York, Bantam Books, 1984.

de los sistemas alejados del equilibrio corresponde a una rigurosa atención al principio de incertidumbre. La nueva síntesis va en sentido contrario a una ganancia de certezas o certidumbres. Si hay alguien que en el pensamiento científico se haya tomado seriamente el legado de **Heráclito** es sin lugar a duda I. **Prigogine**. Precisamente en este sentido, el tercer libro de *La nueva alianza* termina con un reconocimiento de, o un llamado a, descubrir u ocuparnos con el reencanto del mundo.

Lo anterior exige una precisión y al mismo tiempo sienta las bases para una aclaración de la obra de **Prigogine** relativa a las ciencias de la complejidad, o mejor aún, con respecto al concepto mismo de “complejidad”. **Prigogine** no habla nunca de complejidad en el sentido genérico de “ciencia(s) de la complejidad”, esto es, notablemente, en el sentido de los autores, teóricos y científicos del Instituto Santa Fe en Nuevo México. Por el contrario, **Prigogine** prefiere el concepto, bastante más puntual y delimitado, de “comportamientos complejos”. “¿Qué es la complejidad?” se pregunta **Prigogine**, y responde: “... es más realista, por lo menos no tan impreciso, hablar de *comportamiento complejo* en lugar de referirnos a sistemas complejos. El estudio de este tipo de comportamiento esperamos nos permita descubrir algunas características de distintas clases de sistemas y nos conducirá a una comprensión adecuada de lo complejo”⁸. Y más adelante sostiene: “Expresado con brevedad, el comportamiento complejo ya no está limitado exclusivamente al campo de la biología. Se encuentra en un proceso de penetración en las ciencias físicas y parece profundamente enraizado en las leyes de la naturaleza” (*ibid*: 22). Precisamente por esta razón, los comportamientos complejos se explican por, y se integran en, el estudio de los sistemas de no-equilibrio, o también, en la termodinámica de los procesos irreversibles.

En 1980, tres años después de recibir el Premio Nóbel, **Prigogine** escribe *Del ser al devenir. Tiempo y complejidad en las ciencias físicas*. En el prefacio se puede leer: “Este libro es acerca del tiempo. Me hubiera gustado llamarlo: *Tiempo. La dimensión olvidada*, aun cuando este título hubiera sorprendido a algunos lectores. ¿No está el tiempo ya incorporado desde el comienzo en la dinámica,

en el estudio del movimiento? ¿No es el tiempo el propio tema de preocupación de la teoría especial de la relatividad? Esto es ciertamente verdadero. Sin embargo, en la descripción dinámica, sea clásica o cuántica, el tiempo tan sólo entra en un sentido muy restringido, en el sentido de que estas ecuaciones son invariantes con respecto a la inversión del tiempo: $t? -t$. A pesar de ser un tipo específico de interacción, la llamada interacción superdébil parece violar esta simetría del tiempo, la violación no juega ningún papel en los problemas que son el tema de este libro”⁹ (1980: xi).

La tesis que defiende **Prigogine** en su libro de 1980 se formula de tres maneras o en tres pasos, y tiene una radicalidad sin igual. Su tesis es:

- 1) Los procesos irreversibles son tan *reales* como los reversibles, y no corresponden a aproximaciones suplementarias que nosotros superpongamos, por necesidad, sobre los procesos en los que el tiempo es reversible.
- 2) Los procesos irreversibles juegan un papel *constructivo* fundamental en el mundo físico; son la base de importantes procesos coherentes que aparecen con particular claridad en el nivel biológico.
- 3) La irreversibilidad está fuertemente enraizada en la dinámica. Puede decirse que la irreversibilidad comienza cuando los conceptos básicos de la mecánica clásica o cuántica (tales como las trayectorias o las funciones de onda) dejan de ser observables.

Es importante observar que en este libro, al mismo tiempo hay varias referencias fuertes, desde el comienzo hasta el final, a *La nueva alianza*, y por consiguiente a las relaciones entre los temas del libro, la tesis defendida y las conexiones, de un lado, entre la ciencia y la filosofía, así como, de otra parte, entre la ciencia y la cultura. Dos conclusiones de tipo general cabe destacar: el papel del observador —la importancia de la fenomenología, por así decirlo—, es incontestable en el marco de las nuevas ciencias en emergencia, y al mismo tiempo, la ciencia plasma procesos, tendencias y fenómenos culturales, todos los cuales apuntan hacia nuevas y radicales transformaciones que, antes que

8 I. Prigogine y G. Nicholis, *La estructura de lo complejo*, Madrid, Alianza, pág. 21.

9 “This book is about time. I would like to have named it *Time, the Forgotten Dimension*, although such a title might surprise some readers. Is not time incorporated from the start in dynamics, in the study of motion? Is not time the very point of concern of the special theory of relativity? This is certainly true. However, in the dynamical description, be it classical or quantum, time enters only in a quite restricted way, in the sense that these equations are invariant with respect to time inversion, $t? -t$. Although a specific type of interaction, the so-called superweak interaction, seems to violate this time symmetry, the violation plays no role in the problems that are the subject of this book” (traducción, C.E.M.).

cerrar el mundo, nos lo revelan abierto, y por tanto apasionante, teórica y vivencialmente hablando.

En esta misma dirección, de otro lado, en una comunicación a la Academia Europea de Ciencias, Artes y Letras, en 1982, titulada “La lectura de lo complejo”, sostiene **Prigogine**: “Reconocer la complejidad, hallar los instrumentos para describirla y efectuar una relectura dentro de este nuevo contexto de las relaciones cambiantes del hombre con la naturaleza son los problemas cruciales de nuestra época”¹⁰. Pues bien, precisamente por ello se hace imperativa una transformación radical del conocimiento humano. No se requiere de ningún esfuerzo para recordar que, en el sentido biológico de la palabra, una metamorfosis es un fenómeno irreversible.

Existe, sin embargo, un aspecto de una envergadura mayor con respecto tanto al pensamiento y obra de **Prigogine** como al espíritu de *La nueva alianza*. Este aspecto arroja una luz acerca de la especificidad y la necesidad de la complejidad. Pues bien, el tema que vale la pena poner claramente sobre la mesa coincide con la tesis misma de todo el libro mencionado. Se trata de la tesis que afirma la necesidad de inscribir la investigación y el trabajo científicos –en este caso, referidos a los sistemas termodinámicos lejanos del equilibrio– con el entorno social y cultural del que nacen y al que, de alguna manera responden. Recurriendo a la clasificación establecida por I. **Lakatos** entre la historia externa de la ciencia y la historia interna de la ciencia, se trata de atender al mismo tiempo a la historia interna tanto como a la historia externa. El resultado, aun cuando no sean los términos que emplean **Prigogine** y **Stengers**, no puede ser menos sorprendente: la ciencia es una interfase, a saber, entre la cultura misma y las teorías, modelos y explicaciones alcanzadas o realizadas.

La historia del pensamiento racional no conoce una tesis con esta radicalidad, y ciertamente no cuando se la mira retrospectivamente. En efecto, la lectura tradicional afirma que actividades como la ciencia, la filosofía o las artes, en sentido amplio, pueden entenderse por sí mismas, es decir, al margen de su inscripción en el entorno cultural. Precisamente por ello, el estudio tradicional de la ciencia, la filosofía o las artes consistió en el estudio de

los autores, pensadores y artistas (escritores, por ejemplo). De esta forma, la historia de la ciencia consistía en la historia de los científicos; ni siquiera en la historia de las teorías científicas.

Vivimos un mundo altamente sensible a las interacciones de distinto tipo. La complejidad del mundo es el resultado de estas interacciones, cuyo carácter fundamental está marcado por la no-linealidad¹¹. En unas conferencias dedicadas al estudio del caos,¹² **Prigogine** recuerda la deuda que tenemos, todos, con **Poincaré**: “Es en cierto modo una suerte que **Poincaré** haya demostrado la imposibilidad de eliminar las interacciones. Si se pudieran eliminar, el universo sería isomorfo a un universo de partículas libres, y todo sería tan ‘incoherente’ que no habría química, ni biología, ni por supuesto culturas humanas” (1999: 73). La manera puntual, observa **Prigogine**, como puede entenderse esto consiste en enraizar el indeterminismo y la asimetría del tiempo en las leyes de la física (1996: 23), gracias a lo cual, no solamente, como ya lo planteara con anterioridad **Penrose**, será posible alcanzar una comprensión al mismo tiempo física y lógica de la mente, sino, además, y consecuentemente, una mejor y más adecuada explicación de los fenómenos sociales, en sentido amplio. El objeto, así, consiste, dicho en el lenguaje de la física, en construir una dinámica de las correlaciones y no ya una dinámica de las trayectorias (*ibid*: 88).

Propiedades de los sistemas complejos

La emergencia de nuevas ciencias implica siempre el surgimiento de nuevos lenguajes –nuevos conceptos y categorías–, nuevos enfoques, etc. De acuerdo con **Kuhn** (1989), el primer objeto de debate entre la ciencia normal y los nuevos paradigmas en emergencia en cada caso, es el lenguaje, esto es, la traducibilidad y la conmensurabilidad del lenguaje; así, por ejemplo, la traducibilidad de una tradición a otra, de un dominio disciplinar a otro, en fin, de una comunidad académica y científica a otra. Los cuatro ejes que definen los diálogos de teorías, modelos explicativos y formaciones y tradiciones científicas y/o filosóficas son: la (in)conmensurabilidad, la traducibilidad, la interpretación y los marcos de referencia¹³. Es-

10 Prigogine, I., *¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al orden*, Barcelona, Tusquets, 1993, pág. 46.

11 En el que seguramente es el más sólido trabajo sobre la emergencia, J. Holland sostiene que esta es el resultado de dos factores: los mecanismos componentes interactúan sin control central, y las posibilidades de la emergencia aumentan rápidamente en la medida en que la flexibilidad de las interacciones se incrementa (Holland, 1998: 7).

12 El caos es, histórica y conceptualmente hablando, la segunda de las ciencias de la complejidad, después de la termodinámica del no-equilibrio.

13 En el contexto señalado, relativamente al trabajo de los historiadores de la ciencia, Kuhn sostiene de qué manera el historiador es un “intérprete y maestro del lenguaje”.

tos cuatro ejes constituyen al mismo tiempo el terreno en el que la historia interna y la historia externa de la ciencia se cruzan, y el ámbito propio del modo como la ciencia se hace realidad cultural.

Pues bien, la posibilidad de que un lenguaje sea traducible, o mejor aún, conmensurable con otros contextos y tradiciones sin que el contenido expresado o significado se pierda constituye el principal reto en el diálogo entre disciplinas distintas con enfoques, categorías, métodos, tradiciones y expectativas diferentes. La traducibilidad o conmensurabilidad debe ser posible sin desmedro de las especificidades técnicas del lenguaje propio de cada dominio científico.

El lenguaje es el lugar, por así decirlo, donde se muestran las propiedades de los sistemas o fenómenos de estudio. Ahora bien, en el caso de los sistemas complejos, no existe una lista única, por así decir, acerca de sus propiedades o características. Parte de la razón de esta ausencia estriba en el hecho de que no existe una única comprensión o definición de lo que sea “complejidad”; por el contrario, las comprensiones, caracterizaciones o definiciones de complejidad son numerosas y no siempre aceptadas convencionalmente. Precisamente por esta razón una buena opción para obliterar esta dificultad se encuentra en la dirección de su comprensión como sistemas alejados del equilibrio.

No obstante, es preciso identificar algunas de las propiedades generales de los sistemas complejos. De acuerdo con **Bar-Yam** (1998), las propiedades centrales de los sistemas complejos son: los elementos (y su número), las interacciones (y su fuerza), la formación/operación (y sus escalas temporales), la diversidad/variabilidad, el medio ambiente (y sus demandas), la(s) actividad(es) (y su(s) objetivo(s)).

A partir de estas propiedades cabe destacar los rasgos característicos de los sistemas complejos, que son la emergencia, la autoorganización y la complejidad misma del sistema de estudio en cuanto complejidad creciente. (Existe incluso la dificultad de determinar estas características de los sistemas complejos, ya que hay autores que hablan específicamente de la emergencia y de la autoorganización como “teorías” (**Krugman, Kauffman, Holland**)).

El concepto de complejidad creciente es al mismo tiempo un logro de la termodinámica del no equilibrio, y un desarrollo suyo. En efecto, sostiene **Margulis** (1998: 32): “Entre la termodinámica clásica y la termodinámica del no equilibrio hay dos grandes diferencias. La primera es que la termodinámica clásica estudia estructuras de com-

plejidad decreciente (...) mientras que la termodinámica del no equilibrio estudia entidades –seres vivos incluidos– que incrementan su complejidad y ganan capacidad de trabajo. La segunda diferencia, relacionada de manera fundamental con la primera, es que la termodinámica clásica trata de sistemas cerrados y aislados, mientras que la termodinámica del no equilibrio se centra en sistemas abiertos”. Pues bien, es específico de las ciencias de la complejidad estudiar los fenómenos, procesos, comportamientos y sistemas de complejidad creciente. Este *locus* instaura una nueva dimensión para las ciencias, entendidas en sentido clásico, y permite, al mismo tiempo, un encuentro entre ciencias y disciplinas que anteriormente no sabían o no querían saber nada unas de otras.

Ciencias exactas, físicas y naturales, y ciencias sociales y humanas: un encuentro posible

Hay una circunstancia cultural importante para resaltar como condición para exponer el encuentro posible entre los dos grandes grupos de ciencias: las sociales y humanas y las exactas, físicas y naturales. Como es sabido, la historia del siglo XIX y buena parte de la historia del siglo XX asistió al nacimiento fuerte, sólido y multiplicado de las ciencias sociales. Pero, más importante aún, se pudo apreciar al mismo tiempo la importancia y la utilidad, por así decir, de las ciencias sociales y humanas. Tal es la historia de la consolidación y desarrollo de la economía, la historia, la antropología, la psicología, la ciencia política, y posteriormente también las llamadas ciencias de la organización, así como el giro fuerte de la filosofía hacia temas sociales como la ética, el análisis del uso del lenguaje, y otros. Tan sólo la física puede ocupar un lugar cultural tan prominente, dados los desarrollos, en el siglo XIX, de la termodinámica, y en el siglo XX con la teoría de la relatividad y la teoría cuántica.

Pues bien, este estado de cosas se altera notablemente hacia mediados del siglo XX, y particularmente en los años siguientes gracias al desarrollo de la computación. Gracias al computador, las llamadas ciencias “duras” vuelven a adquirir un lugar tan destacado como el que, por ejemplo, tuvieron en los siglos XVI, XVII y XVIII, notablemente. Debido al desarrollo de la computación sucede un fenómeno apasionante y desconcertante para las ciencias sociales y humanas: en lo sucesivo los aportes más significativos a los problemas sociales, en el sentido amplio de la palabra, proviene de las ciencias exactas, físicas y naturales, por ejemplo, mediante aplicaciones de métodos y procedimientos computacionales, o también gracias al desarrollo de analogías a partir de los sistemas biológicos y otros. Los ejemplos más conspicuos son jus-

tamente la teoría –primero– y la ciencia –luego– del caos, y la teoría de las catástrofes (**Thom & Zeeman**, notablemente), y más integralmente, las ciencias de la complejidad o el estudio de los sistemas complejos no lineales. Debido a esta circunstancia, las ciencias vieron redefinidos, al mismo tiempo su estatuto, sus relaciones, sus campos y problemas.

En este punto, vale retomar a **Prigogine** en un texto con el título “¿Un siglo de esperanza?” (1996b): “...mientras que las otras ciencias permitían soñar en una dominación total sobre la naturaleza, la termodinámica hablaba de los límites de la manipulación, de la espontaneidad y de las evoluciones naturales: un lenguaje contrario al de las ciencias heredadas del siglo XVIII. Hoy en día estos puntos de vista se aproximan, ya que en las otras ciencias también comenzamos a percibir los límites de la manipulación. La interpretación microscópica de la irreversibilidad que he expuesto aquí refuerza aun más esta dimensión del límite de la manipulación (...) ya que no podemos elegir arbitrariamente las condiciones iniciales”.

Digámoslo puntualmente: el encuentro entre las ciencias sucede gracias a una dúplice posibilidad: el desarrollo de la computación –y más exactamente de la simulación–, y la emergencia del estudio de los sistemas complejos. Quisiera, con todo, insistir en esta particularidad cultural: en el marco del estudio de los sistemas complejos se produce un acercamiento, por así decirlo, de las llamadas ciencias duras hacia las ciencias sociales pero en un terreno en el cual ambos grupos de ciencias confluyen pero modifican sus relaciones, y con ello, ver alterado el propio estatuto que tradicionalmente tenían.

En efecto, prácticamente la totalidad de los textos sobre sistemas complejos y no-linealidad terminan, generalmente en el último capítulo o las últimas páginas, haciendo extrapolaciones desde los campos primeros de estudio, hacia las ciencias sociales y humanas. Algunos ejemplos notables se encuentran en **Kauffman** (1995)¹⁴, **Prigogine** (1980), **Bar-Yam** (1997) **Bak** (1996)¹⁵, **Holland** (1995)¹⁶.

Por su parte, también desde las ciencias sociales se produce una sensibilidad hacia las nuevas ciencias de la complejidad. Hasta el momento, la economía es la más sensible de las ciencias sociales¹⁷, y más recientemente también la incorporación de la complejidad con la teoría de juegos y los temas de la teoría de la acción colectiva (**Axelrod & Cohen**, 1999)¹⁸. Hay aquí semillas que pueden permitir un trabajo mancomunado entre la (ciencia, teoría o filosofía) política con la perspectiva de los sistemas dinámicos no-lineales.

El estudio de la complejidad, que *grosso modo* coincide con la cantidad de información necesaria para describir (el comportamiento de) un sistema, adopta dos vertientes principales, así:

- i) Mientras que todos los sistemas simples son igualmente simples, cada sistema complejo posee su propia complejidad;
- ii) Existen procesos o principios básicos, que son elementales, en la base de los múltiples y diversos sistemas complejos.

Pues bien, i) y ii) son posiciones inconmensurables, y tienen productos sólidos. Buena parte de la elaboración

14 “The emerging sciences of complexity, as we shall see, offer fresh support for the idea of a pluralistic democratic society, providing evidence that it is not merely a human creation but part of the natural order of things” (Kauffman, 1995: 5).

15 “So far we have proceeded from astrophysics to geophysics, and from geophysics to biology and the brain. We now take yet another step in the hierarchy of complete phenomena, into the boundary between the natural world and the social sciences. Humans interact with one another. Is it possible that the dynamics of human societies are self-organized critical? After all, human behavior is a branch of biology, so why should different laws and mechanisms be introduced at this point? Here two specific human activities will be considered, namely economics and traffic” (Bak, 1996: 183).

16 Las condiciones necesarias para la comprensión de los sistemas complejos, llamados también sistemas complejos adaptativos (SCA) son: interdisciplinariedad, experimentos mentales basados en computadores, un principio de correspondencia de acuerdo con el cual los modelos elaborados deben comprender modelos anteriores en disciplinas relevantes, una matemática de procesos competitivos basados en recombinación (Holland, 1995: 170-2).

17 “El mundo está repleto de sistemas de autoorganización, sistemas que forman estructuras no sólo como mera respuesta a *inputs* externos sino también, y en primer lugar, como respuesta a su propia lógica interna. Si el tiempo meteorológico global es un sistema de autoorganización, la economía global lo tendrá que ser también” (Krugman, 1996: 135. Para establecer que así sucede efectivamente en la economía, Krugman dos principios de autoorganización: el orden producto de la inestabilidad, y el orden producto del crecimiento aleatorio.

18 Quizás el trabajo más radical de parte de las ciencias sociales en el proceso de incorporación de las estructuras de pensamiento, la lógica y la heurística de las ciencias de la complejidad es el de González Casanova (2004).

de una teoría (general) de los sistemas complejos dependerá de la suerte que corran las relaciones entre ambas posturas. La línea central, adoptada por el Instituto Santa Fe (ISF) es la segunda, de suerte que en la base de la complejidad de sistemas, fenómenos y comportamientos tan disímiles como el funcionamiento del cerebro, la dinámica de los sistemas financieros, el crecimiento de las ciudades, los sistemas ecológicos, la evolución cósmica o las dinámicas de poblaciones de insectos, por ejemplo, existen *–deben existir–* principios básicos que tanto generen complejidad como que, por tanto, la expliquen. Naturalmente, se trataría de principios universales. Este es un problema eminentemente filosófico que atraviesa y marca a las diversas disciplinas científicas tanto como al diálogo y las relaciones entre sí.

En 1994, a los diez años de creado el ISF de Nuevo México, considerado como el centro pionero del trabajo en complejidad, se realizó un seminario con la participación de los más importantes científicos, investigadores y teóricos de la complejidad, a fin de evaluar el trabajo adelantado hasta la fecha (Cowan *et al.*, 1994). La conclusión no pudo ser más sorprendente: a pesar del éxito y el crecimiento rápido y sólido en el estudio de los sistemas, fenómenos y comportamientos caracterizados por no-linealidad, autoorganización, emergencia, no equilibrio o equilibrios dinámicos, etc., el trabajo encontraba un límite: se trataba de la ausencia de una teoría de los sistemas complejos no-lineales. En efecto, la inmensa mayoría de los trabajos consistía, y aún consiste, o bien en la aplicación de criterios de complejidad, o bien, igualmente, en trabajos de simulación con computador de importantes problemas en determinadas esferas de estudio, en cada caso. En 1999 el resultado del seminario fue reeditado sin ninguna modificación, lo cual significa que en el lustro siguiente la situación no había cambiado. La elaboración de una teoría general, por así decirlo, de los sistemas complejos no-lineales es una labor que aún queda por cumplir.

Puede decirse que existen dos generaciones en el trabajo en complejidad. La primera consistió en un trabajo, importante y necesario, en ciencias exactas, básicas y naturales, con fuerte énfasis en física, matemáticas y computación. Este trabajo no puede ni debe detenerse. Sin embargo, una segunda generación en el estudio de los sistemas complejos sostiene que debe hacerse énfasis en las ciencias sociales (y humanas), a partir de un problema

específico de investigación: la inteligencia colectiva (*swarm intelligence*). Pues bien, los temas y problemas que se concentran en el título “inteligencia colectiva” plantean de manera frontal la importancia, la necesidad y las posibilidades de una dinámica de interacciones (y no ya simplemente de trayectorias)¹⁹. Los ejes en torno a los cuales se tejen las posibilidades de esta segunda generación son conceptos tales como robustez y flexibilidad.

El problema en torno al cual se tejen los conceptos, problemas y modelos que se condensan en la inteligencia colectiva tienen que ver metáforas para resolver problemas. Notablemente, se trata del estudio de sistemas “inteligentes” *colectivos* en los que la autonomía, la emergencia y la distribución de funciones remplazan al control, la preprogramación y la centralización. Tomando como hilo conductor el estudio de los insectos sociales –los cuales han demostrado ser evolutivamente tan exitosos en la biosfera–, el enfoque de inteligencia colectiva destaca cuatro factores determinantes para su éxito: flexibilidad, robustez, control descentralizado y autoorganización. A partir de este hilo conductor, el objetivo consiste en extender los análisis y la elaboración de modelos en general hacia toda clase de sistemas sociales –naturales y artificiales–, dado un hecho fundamental: el mundo se hace crecientemente complejo, dinámico y sobrecargado de información, como nunca antes lo había estado (Bonabeau *et al.*, 1999). Precisamente en este mundo los motivos de sistemas alejados del equilibrio, la autoorganización y la emergencia se convierten en referentes indispensables. En verdad, las interacciones se hacen cada vez más numerosas, sutiles, y de corto, mediano y largo alcance tanto en el espacio como en el tiempo.

Pues bien, ésta, puede decirse, es la investigación de punta –o el estado de punta– en el estudio de los sistemas complejos adaptativos. El trabajo que promete la investigación en inteligencia colectiva indica claramente dos fenómenos. De un lado, que las ciencias sociales deben haber podido incorporar herramientas, aproximaciones, lenguajes y lógicas que antiguamente eran propias de las ciencias naturales, físicas o exactas. Pero, al mismo tiempo, se trata del reconocimiento de que las ciencias físicas, exactas y naturales pueden aportar decisivamente al estudio de los sistemas sociales naturales y artificiales (Kennedy & Eberhardt, 2001). Esta circunstancia tanto ilustra como sostiene la tesis que se ha querido elaborar

19 Al respecto, y en estrecha conexión con la idea de acuerdo con la cual la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio introduce el tiempo y la historia en la física, vale bien lo que dice Kauffman: “We lack a theory of how elements of our public lives link into webs of elements that act on one another and transform one another. We call these transformations “history”. El término “historia” aparece entre comillas para designar no la historia lineal tradicional, sino el carácter de abierto de los sistemas complejos.

con este texto. Pues bien, el encuentro entre las ciencias sociales y humanas con las ciencias exactas, físicas y naturales en el estudio de los sistemas complejos adaptativos, esto es, sistemas alejados del equilibrio, se anticipa como enriquecedor para ambos grupos. Pero, como se observa a partir de los más recientes trabajos adelantados en el Instituto Santa Fe, por ejemplo, el diálogo entre disciplinas se hace ya no solamente necesario, sino inevitable. Su inevitabilidad está marcada por la forma en que antiguos problemas se redefinen y en que nuevos problemas aparecen, frente a todo lo cual la ciencia debe actualizar su propia lógica y heurística. Tal es, exactamente, el valor de las nuevas ciencias de la complejidad.

En un mundo marcado por un complejo procesamiento de información como resultado de la dinámica de interacciones sociales, es inevitable y evidente que los fenómenos, comportamientos y sistemas se hagan crecientemente complejos. La relación entre eventos en un medio ambiente físico y las simulaciones sugiere que los problemas emergentes pueden ser vistos, explicados y resueltos gracias a la adopción de criterios, marcos y herramientas novedosas²⁰. Las nuevas ciencias de la complejidad avanzan un terreno importante en esta dirección.

Para terminar, quisiera radicalizar, y con ello mismo puntualizar, la idea aquí trabajada. No simplemente es posible, necesario e inevitable un diálogo entre las ciencias —ciencias exactas, físicas y naturales, y las ciencias sociales y humanas—. Más exactamente, asistimos hoy a una evidente conexión, esto es, a una tendencia a la integración, entre las ciencias naturales y las sociales. Esta conexión modifica de manera sustancial la comprensión tanto de la naturaleza como de la cultura y la sociedad humanas poniendo de manifiesto que existe una comunidad de problemas —y, por extensión de soluciones—, que son transversales, complementarias o también en paralelo. Así, no tiene ya sentido abordar un problema e intentar resolverlo en un plano sin considerar de manera seria otros planos paralelos o yuxtapuestos, contiguos o transversales. Nunca como ahora, la idea de saberes, conocimientos y prácticas complementarios cobra tanto valor y realidad. El motivo unificador de las ciencias es el reconocimiento de problemas de frontera, dando así lugar a ciencias de frontera. Las ciencias de la complejidad son, exactamen-

te, ciencias de frontera, definidas a partir de, y posibilitadas por, problemas de frontera. La comprensión y explicación del mundo y de la naturaleza en general, al igual que las propias relaciones con la naturaleza y entre los seres humanos sufre, mediante esta conexión, una transformación radical. Ya no nos referimos a la naturaleza —a los otros, etc.—, en términos puramente objetivistas, externos y, por tanto, instrumentales. Es cierto que la complejidad es relativa al agente y se debe precisamente por la presencia y la acción del agente. Pero esta noción no adquiere ya el sentido subjetivista que la modernidad le adscribió. El agente mismo no es ya pura y simplemente sujeto, sino, de manera más precisa, se reconoce a sí mismo como una interfase entre sí mismo(a) y su entorno espacial y temporal, y los fenómenos, procesos, comportamientos y sistemas sobre los que está referido(a). Pero quizás la consecuencia más relevante del encuentro entre las ciencias sociales y las naturales es la crítica y la desaparición de la comprensión heredada del platonismo y el aristotelismo y que sostuvieron la idea de una jerarquía de conocimientos, lenguajes y prácticas. Pues bien, la idea de saberes, prácticas y conocimientos jerárquicos y jerarquizados no es sino la expresión, abstracta, de jerarquías entre los seres humanos, y entre estos y el medio ambiente. Y la jerarquía supuso siempre la noción de exclusión. Con las ciencias de la complejidad, en contraste, asistimos por primera vez, en la historia de la humanidad occidental, a la codependencia, coimplicación y coevolución de los diversos conocimientos. Con ello, el mundo entero adopta una dimensión desconocida hasta ahora. Y el resultado más destacado de todos es el cuidado y el posibilitamiento de la vida en general: de la vida humana, y con ella, de la vida en general sobre el planeta; de la vida conocida tanto como de la vida tal y como podría ser (*life-as-it-could-be*). No en última instancia, en efecto, el fenómeno de máxima complejidad conocido son los sistemas vivos, o también, los sistemas que exhiben vida. Las ciencias de la complejidad son ciencias de la vida, aun cuando lo contrario no se pueda sostener.

Agradecimientos

A Eugenio Andrade, de la Universidad Nacional sede Bogotá, por sus comentarios precisos, que contribuyeron a enriquecer y hacer más inteligible este texto. A Juan

20 "Sometimes the world provides explanation for informational processes that have no necessary referent. A mathematical system might be represented as a set of algebraic symbols and describe the behaviors of a wide range of systems; for instance, the formula for a sine wave can be used to describe the dynamics of many kinds of systems, from electromagnetic transmissions to astronomical orbits. The abstract system itself is just that, an abstraction, but its properties can be understood by comparison to events in the world, and people have an understanding of what a sine wave is and what it does because they know of sine-like phenomena in the world. The physical world provides material for understanding ideal phenomena" (Kennedy and Eberhardt, 2001: 422).

Camilo Rodríguez por sugerirme una idea determinante que dio origen a este trabajo. Al CIPE, de la Universidad Externado, por el apoyo brindado todo el tiempo para la realización de esta investigación. Y a un evaluador anónimo que hizo importantes comentarios y sugerencias que ayudaron a esclarecer este texto.

Bibliografía

- Axelrod, R., & Cohen M.** 1999. *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientific Frontier*, The Free Press, New York, 184 p.
- Bak, P.** 1996. *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*, Springer-Verlag, New York, 212 p.
- Bar-Yam, Y.** 1997. *Dynamics of Complex Systems*, Addison-Wesley, Reading, MA., 848 p.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G.** 1999. *Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems*. (A Volume in the Santa Fe Studies in the Sciences of Complexity), Oxford University Press, New York/Oxford, 307 p.
- Cowan, G., Pines, D., Meltzer, D.** (eds.) 1994. *Complexity. Metaphors, Models and Reality*, Perseus Books, Cambridge, MA, 731 p.
- González Casanova, P.** 2004. *Las Nuevas Ciencias y las Humanidades. De la Academia a la Política*, Anthropos/ISS-UNAM, Barcelona, 478 p.
- Holland, J.** 1995. *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*, Perseus Books, Reading, MA, 185 p.
1998. *Emergence. From Chaos to Order*, Addison-Wesley, Reading, MA, 258 p.
- Kauffman, S.** 1995. *At Home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford University Press, Oxford/New York, 321 p.
- Kennedy, J., Eberhart, R., & Y. Shi** 2001. *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, 512 p.
- Kondepudi, D., Prigogine, I.** 1998. *Modern Thermodynamics. From Heat Engines to Dissipative Structures*. John Wiley & Sons, 486 p.
- Krugman, P.** 1996. *La organización espontánea de la economía*, Antoni Bosch, Barcelona, 167 p.
- Kuhn, Th.** 1989. "Conmensurabilidad, comparabilidad y comunicabilidad", en: *¿Qué son las revoluciones científicas? Y otros ensayos*, Paidós, Barcelona, (textos originales en inglés, 1983-1987), pp. 95-135.
- Margulis, L. y Sagan, D.** 1998. *¿Qué es el sexo?*, Tusquets, Barcelona (original en inglés, 1997), 256 p.
- Nicholis, G. & Prigogine, I.** 1977. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*, Wiley-Interscience, New York.
- _____. 1987. *La estructura de lo complejo. En el camino hacia una nueva comprensión de las ciencias*, Alianza, Madrid (traducción del alemán, 1987), 390 p.
- Prigogine, I.** 1962a. *Introduction to Nonequilibrium Thermodynamics*, Wiley-Interscience, New York.
- _____. 1962b. *Nonequilibrium Statistical Mechanics*, Wiley, New York, 319 p.
- _____. 1977. *Nobel Lecture in Chemistry. Time, Structure and Fluctuations*, s.l.
- _____. 1980. *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*, W. H. Freeman and Co., San Francisco, 272 p.
- _____. 1993. *¿Tan sólo una ilusión? Una exploración del caos al orden*, Tusquets, Barcelona (textos originales en inglés, 1972-1982), 332 p.
- _____. 1993. *El nacimiento del tiempo*, Tusquets, Barcelona (original en italiano, 1988), 98 p.
- _____. 1996a. *El fin de las certidumbres*, Editorial Andrés Bello, Santiago de Chile (original en francés, 1996), 222 p.
- _____. 1996b. *El tiempo y el devenir. Coloquio de Cerisy*, Gedisa, Barcelona (original en francés, 1988), 358 p.
- _____. 1999. *Las leyes del caos*, Crítica, Barcelona (original en francés, 1993), 155 p.
- Prigogine, I. & Stengers, I.** 1990. *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*, Alianza, Madrid (segunda edición; original en francés, 1979; segunda edición en francés, 1986), 359 p.
- Waldrop, M.** 1992. *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Chaos*, Simon & Schuster, New York, 380 p.
- Wilson, E.** 1998. *Consilience. The Unity of Knowledge*, Alfred A. Knopf, New York, 332 p.

Recibido el 16 de junio de 2002

Aceptado para su publicación el 15 de junio de 2005

UTILIDAD DEL MÉTODO EXTENDIDO DE HILDEBRAND EN EL ESTUDIO DE LA SOLUBILIDAD DEL ACETAMINOFÉN EN MEZCLAS AGUA-PROPILENOGLICOL

por

Fleming Martínez*

Resumen

Martínez, F.: Utilidad del método extendido de Hildebrand en el estudio de la solubilidad del acetaminofén en mezclas agua-propilenglicol. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **29** (112): 429-438. 2005. ISSN 0370-3908.

En este trabajo, el Método Extendido de Solubilidad de Hildebrand (MESH), desarrollado por Martín et al., se ha aplicado al estudio de la solubilidad del acetaminofén en mezclas binarias agua-propilenglicol a 25.00°C. Para este fin se han utilizado unos desarrollos experimentales y de cálculo, sencillos y útiles para la estimación del volumen molar del soluto y de la fracción volumétrica del solvente en la solución saturada. Se ha encontrado una adecuada capacidad predictiva del MESH al utilizar un modelo polinómico regular de cuarto orden, relacionando el parámetro de interacción W con el parámetro de solubilidad de las mezclas solventes.

Palabras clave: Acetaminofén, Estimación de solubilidad, Método Extendido de Solubilidad de Hildebrand, Mezclas cosolventes.

Abstract

In this work the Extended Hildebrand Solubility Approach (EHSA) developed by Martin et al., has been applied to evaluate the solubility of acetaminophen in water-propylene glycol cosolvent mixtures at 25.00 °C. Some novel and relatively simple experimental and calculating methods have been used here in order to estimate the molar volume of the solute and the volumetric fraction of the solvent in the saturated solution. A good predictive capacity of EHSA was found using a regular polynomial model in order four, when the W interaction parameter was related to the solubility parameter of the solvent mixtures.

Key words: Acetaminophen, Solubility estimation, Extended Hildebrand Solubility Approach, Cosolvent mixtures.

* Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia, A. A. 14490, Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: fmartinezr@unal.edu.co

Introducción

El acetaminofén (ACF) es un analgésico y antipirético ampliamente utilizado en la terapéutica actual con especial indicación en el tratamiento de pacientes pediátricos (Roberts II LJ & Morrow JD, 2001; Lund W, 1994). En el mercado farmacéutico colombiano se dispone comercialmente en forma de tabletas, jarabes y concentrados (gotas), pero no en formulaciones inyectables (Rosenstein-Ster, 2004). Puesto que las formulaciones líquidas inyectables se caracterizan por suministrar una alta dosis de fármaco en un pequeño volumen de producto, entonces algunas propiedades fisicoquímicas tales como la solubilidad y los volúmenes ocupados por los principios activos y los otros componentes en la solución, se tornan muy importantes para el diseñador farmacéutico. Lo anterior adquiere gran relevancia práctica, ya que el conocimiento, el adecuado manejo y de ser posible, la predicción de estos fenómenos, facilita enormemente la labor de este profesional durante su labor en el desarrollo de medicamentos (Jiménez F & Martínez F., 1995).

Por lo anteriormente expuesto, en este trabajo se presenta un estudio fisicoquímico sobre la predicción de la solubilidad del ACF a 25.00°C en mezclas binarias cosolventes formadas por agua y propilenoglicol (Pérez DC *et al.*, 2003). El estudio está basado en el Método Extendido de Solubilidad de Hildebrand (MESH) (Martin A *et al.*, 1993), el cual fue desarrollado por el Prof. Alfred N. Martin y otros investigadores para su aplicación práctica en sistemas de interés farmacéutico (Martin A. *et al.*, 1980; Martin A. & Wu PL, 1981; Martin A. & Miralles MJ 1982; Martin A *et al.*, 1982). Para este fin se determinó la solubilidad del fármaco en los solventes puros y en diferentes mezclas cosolventes, utilizando un método refractométrico descrito ampliamente y que está basado en la variación lineal del índice de refracción con la concentración del soluto (Ferro V. & Ávila A 1986; Cárdenas CA & Guevara CC 2003; Pérez DC 2003; Pérez DC *et al.*, 2003). Además, con el fin de aplicar el MESH a este sistema, a partir de medidas de densidad se calcularon las contribuciones volumétricas del soluto y del solvente a las soluciones saturadas, utilizando además algunos datos de la literatura sobre las propiedades relativas a la fusión de este fármaco.

Aspectos Teóricos

La solubilidad ideal (X_2^{id}) de un soluto sólido en un solvente líquido para obtener una solución líquida se calcula mediante la expresión (Ávila CM & Martínez F., 2002):

$$\log X_2^{id} = -\frac{\Delta H_{fus}(T_{fus}-T)}{2.303RT_{fus}T} + \left(\frac{\Delta C_p}{2.303R}\right) \left[\frac{(T_{fus}-T)}{T} + \ln\left(\frac{T}{T_{fus}}\right)\right] \quad [\text{Ec. 1}]$$

en la cual, ΔH_{fus} es la entalpía de fusión del soluto, ΔC_p es la diferencia de capacidades caloríficas entre el soluto sólido y el soluto como líquido sobre-enfriado, R es la constante de los gases ($1.987 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) T_{fus} es la temperatura absoluta de fusión del soluto y T es la temperatura absoluta de la solución. Puesto que la determinación experimental de ΔC_p es muy complicada, tradicionalmente se han realizado dos aproximaciones en la estimación de la solubilidad ideal, esto es, asumir que ΔC_p es igual a la entropía de fusión o que es igual a cero. Considerando la última aproximación, se llega a:

$$\log X_2^{id} = -\frac{\Delta H_{fus}(T_{fus}-T)}{2.303RT_{fus}T} \quad [\text{Ec. 2}]$$

La solubilidad ideal depende exclusivamente de las propiedades del soluto sin considerar en absoluto a las propiedades del solvente, por lo cual en principio este valor es constante y solo depende de la temperatura. En una solución ideal se tiene que los cambios entálpico y volumétrico, durante el proceso de disolución son iguales a cero y por lo tanto el proceso se conduce únicamente de forma entrópica. Naturalmente, las soluciones ideales son inexistentes y solo sirven para explicar el comportamiento de las soluciones reales, en términos de las desviaciones presentadas por estas respecto al comportamiento ideal. Estas desviaciones son debidas principalmente a interacciones intermoleculares soluto-solvente o solvente-solvente y a efectos volumétricos.

La solubilidad real (X_2) se calcula adicionando el término de no-idealidad ($\log \gamma_2$) a la expresión anterior [Ec. 2], para obtener (Martin A *et al.*, 1993; Ávila CM & Martínez F., 2002):

$$-\log X_2 = \frac{\Delta H_{fus}(T_{fus}-T)}{2.303RT_{fus}T} + \log \gamma_2 \quad [\text{Ec. 3}]$$

El término γ_2 es el coeficiente de actividad del soluto en la solución saturada y debe ser determinado experimentalmente para soluciones reales, en las cuales como se indicó previamente, se presentan interacciones de diversa índole, sin embargo se han desarrollado diferentes técnicas para hacer estimados razonables de este término. Un ejemplo específico de esto lo constituyen las soluciones regulares (Yalkowsky SH., 1999) introducidas por Hildebrand y Scatchard, en las cuales, a diferencia de las soluciones ideales, se permite un ligero cambio entálpico positivo, esto es, se requiere suministrar una pequeña cantidad de energía para que se conduzca el proceso de solución, mientras que el cambio entrópico es el correspondiente a una

solución ideal. La solubilidad en las soluciones regulares (Hildebrand JH *et al.*, 1970; Martin A. *et al.*, 1993; Yalkowsky SH., 1999) se obtiene a partir de:

$$-\log X_2 = \frac{\Delta H_{fus}(T_{fus} - T)}{2.303RT_{fus}T} + \frac{V_2\phi_1^2}{2.303RT}(\delta_1 - \delta_2)^2 \quad [\text{Ec. 4}]$$

en la que, V_2 es el volumen molar parcial del soluto ($\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$), ϕ_1 es la fracción volumétrica del solvente en la solución saturada y δ_1 y δ_2 son los parámetros de solubilidad del solvente y del soluto respectivamente. El parámetro de solubilidad se define como la raíz cuadrada de la densidad de energía cohesiva y se calcula como:

$$\delta = \left(\frac{\Delta H_v - RT}{V_l} \right)^{0.5} \quad [\text{Ec. 5}]$$

donde, ΔH_v es la entalpía de vaporización y V_l es el volumen molar del líquido. En la literatura (Hansen CM & Beerbower A., 1971; Martin A. *et al.*, 1993) se encuentran disponibles los valores de parámetro de solubilidad para muchos solventes y también para algunos compuestos sólidos, entre ellos varios fármacos.

Puesto que la mayoría de soluciones de interés farmacéutico se desvían notoriamente del comportamiento de las soluciones regulares (debido al tipo de interacciones presentes, en particular la formación de enlaces de hidrógeno, y a la diferencia en los volúmenes molares entre solutos y solventes) Martin *et al.*, plantearon a comienzos de los años 80 la Aproximación Extendida de Solubilidad de Hildebrand, la cual ha resultado muy útil para estimar la solubilidad de varios fármacos en sistemas cosolventes binarios y ternarios (Martin A. *et al.*, 1980; Martin A. & Wu PL 1981; Martin A. & Miralles MJ., 1982; Martin A. *et al.*, 1982).

Si se define el término volumétrico-energético, A , como:

$$A = \frac{V_2\phi_1^2}{2.303RT} \quad [\text{Ec. 6}]$$

entonces, la solubilidad real de un soluto en cualquier sistema solvente se puede calcular a partir de:

$$-\log X_2 = -\log X_2^{id} + A(\delta_1^2 + \delta_2^2 - 2W) \quad [\text{Ec. 7}]$$

en la cual, el término W es igual a $2K\delta_1\delta_2$, donde K es el parámetro de Walker introducido inicialmente para el estudio de soluciones de polímeros. El factor W compensa las desviaciones respecto al comportamiento de soluciones regulares, y se calcula a partir de datos experimentales como:

$$W = 0.5 \left(\delta_1^2 + \delta_2^2 - \frac{\log \gamma_2}{A} \right) \quad [\text{Ec. 8}]$$

donde, γ_2 como se indicó anteriormente, es el coeficiente de actividad del soluto en la solución y se calcula de acuerdo con:

$$\gamma_2 = \frac{X_2^{id}}{X_2} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Los valores obtenidos experimentalmente para el factor W pueden ser correlacionados mediante análisis de regresión usando polinomios regulares de orden superior en función del parámetro de solubilidad de las mezclas solventes así:

$$W = C_0 + C_1\delta_1 + C_2\delta_1^2 + C_3\delta_1^3 \dots + C_n\delta_1^n \quad [\text{Ec. 10}]$$

Estos modelos polinómicos pueden ser utilizados para estimar la solubilidad por retro-cálculo (regresión en el cálculo, usando la ecuación obtenida a partir de los datos experimentales), resolviendo esta propiedad a partir del factor W obtenido de la regresión [Ec. 10].

Materiales y Métodos

En esta investigación se utilizaron los siguientes materiales: acetaminofén USP (ACF) (USP23-NF18 1994); agua destilada de conductividad $< 2 \mu\text{S}$; propilenglicol USP deshidratado (PG); tamiz molecular Merck (números 3 y 4); filtros Durapore® 0.45 μm Millipore Corp.; bureta con chaqueta para circulación de agua; material aforado de vidrio (Pérez DC *et al.*, 2003).

Preparación de las mezclas cosolventes

Se prepararon mezclas binarias agua-PG de composición desde 0.00 hasta 100.00 % p/p de PG variando de 10.00 en 10.00 % p/p, por pesada en una balanza digital de platillo externo, Mettler Toledo PB302 de sensibilidad $\pm 0.01 \text{ g}$, estudiando así las propiedades en los dos solventes puros y de nueve mezclas solventes.

Determinación del índice de refracción y la densidad

El índice de refracción se determinó utilizando un refractómetro Abbe Carlzeiss Jena con recirculación de agua, conectado a un termostato Magni Whirl Blue M a $25.00 \pm 0.05^\circ\text{C}$. La muestra se colocó sobre la superficie de los prismas, por medio de un agitador de vidrio y leyendo el ángulo crítico en la escala del instrumento. La densidad de las soluciones se determinó utilizando un

densímetro digital DMA 45 Anton Paar conectado a un termostato a $25.00 \pm 0.05^\circ\text{C}$ según procedimiento descrito previamente (Martínez F. & Rojas JH., 1999; Martínez F *et al.*, 2002). El densímetro se calibró según las instrucciones del catálogo del equipo a 25.00°C (Anton Paar KG., 1980). Las soluciones se introdujeron en el tubo de vibración del equipo utilizando una jeringa plástica de 2 mL esperando hasta la estabilización de la lectura de densidad en la pantalla digital (expresada en g cm^{-3}).

Determinación de la solubilidad del ACF

Se colocaron cantidades específicas de las diferentes mezclas agua-PG y de los solventes puros en frascos de vidrio NP (No parenteral: Tipo IV) y en cada uno se adicionó un exceso de acetaminofén, se taparon los frascos, se agitaron mecánicamente en un agitador Burrell ® Modelo 75 durante una hora y se colocaron en el baño termostatado a $25.00 \pm 0.05^\circ\text{C}$ durante al menos 48 horas (tiempo de equilibrio previamente establecido para este fármaco en estos solventes a 20.0°C por Fonseca JC & Coronado YP., 1998). Se tomaron muestras de las soluciones sobrenadantes y se filtraron aquellas soluciones en las cuales el acetaminofén se ubicó en la superficie de la solución. Se determinó el índice de refracción y la densidad del filtrado siguiendo el procedimiento mencionado anteriormente.

A partir de los valores obtenidos de índice de refracción para soluciones de diferentes concentraciones de ACF (soluciones preparadas por volumen usando material aforado y una balanza analítica digital Mettler AE 160 de sensibilidad ± 0.1 mg) en cada una de las mezclas agua-PG, se elaboraron curvas de calibración, obteniéndose ecuaciones lineales, a partir de las cuales se calculó la concentración molar de ACF en las soluciones saturadas, esto es la solubilidad a 25.00°C (Cárdenas CA & Guevara CC., 2003; Pérez DC *et al.*, 2003). Todos los procedimientos indicados se realizaron al menos tres veces y los respectivos resultados fueron promediados.

Cálculo de las contribuciones volumétricas

Puesto que en el modelo de soluciones regulares de Hildebrand y Scatchard [Ec. 4] y en el modelo extendido por Martin *et al.* a soluciones reales [Ec. 7], se requieren las contribuciones volumétricas de cada componente (soluto y solvente) a la solución saturada, aquí se indica un método aproximado bastante sencillo para su estimación, basado en la densidad y la composición de la solución saturada.

La densidad de una solución (ρ_{sol}) depende de la masa total de los componentes y del volumen total de los mis-

mos, lo que permite plantear la siguiente expresión (Pérez DC *et al.*, 2003):

$$\rho_{sol} = \frac{m_2 + m_1}{v_2^p + v_1^p} \quad [\text{Ec. 11}]$$

en la cual, m_2 y m_1 son las masas de soluto y solvente respectivamente, v_2^p y v_1^p son los volúmenes parciales del soluto y del solvente en la solución. Suponiendo que el volumen ocupado por el solvente en la solución (es decir el volumen parcial), es igual al volumen del solvente puro (esto es, $v_1^p = v_1$), puede entonces plantearse el concepto de volumen de desplazamiento D , como el volumen que ocupa un gramo del compuesto en la solución. Por lo tanto se tiene que $v = m D$, llegando a la siguiente expresión:

$$\rho_{sol} = \frac{m_2 + m_1}{m_2 D_2 + m_1 D_1} \quad [\text{Ec. 12}]$$

donde los subíndices 2 y 1 nuevamente se refieren al soluto y al solvente respectivamente. D_1 corresponde al volumen específico del solvente (el cual puede ser multicomponente) y se calcula como el recíproco de la densidad. Despejando D_2 algebraicamente de la Ec. 12, se tiene que el volumen de desplazamiento de un soluto en cualquier solución se puede calcular como:

$$D_2 = \frac{m_2 + m_1(1 - D_1 \rho_{sol})}{m_2 \rho_{sol}} \quad [\text{Ec. 13}]$$

Multiplicando D_2 por la masa molar del soluto se obtiene el volumen molar desplazado, el cual es una buena aproximación del volumen molar parcial de este componente en la solución, puesto que es coincidente con el volumen molar aparente del soluto (ϕ_v). Debe aclararse que el volumen de desplazamiento (volumen específico aparente) es solo una aproximación ya que la condición inicial ($v_1^p = v_1$), solo se cumple en el caso de soluciones ideales. Sin embargo este concepto ha resultado muy útil en el diseño de formas farmacéuticas líquidas homogéneas, en especial para aquellas destinadas a la administración parenteral, aun cuando los solventes utilizados en estos productos no se comportan de manera ideal (Parrot EL & Sasaki W., 1977; Vargas RA *et al.*, 2000; Rodríguez S *et al.*, 2002). La fracción volumétrica del solvente en la solución se puede obtener como la diferencia debida al soluto respecto al volumen total de la solución, asumiendo nuevamente que el volumen parcial del solvente es el correspondiente al solvente puro.

Resultados y Discusión

En la Tabla 1 se presenta la composición másica y volumétrica de las mezclas solventes agua-PG junto con

Tabla 1. Composición de las mezclas solventes agua-PG, densidad de las mezclas (g cm^{-3}), fracción volumétrica de PG en las mezclas y parámetros de solubilidad ($\text{cal}^{1/2} \text{cm}^{-3/2}$) de las mezclas a 25.00°C .

PG / % p/p	ρ_i	ϕ PG	δ_i
0.00	0.9970	0.0000	23.40
10.00	1.0043	0.0972	22.56
20.00	1.0128	0.1961	21.71
30.00	1.0213	0.2967	20.85
40.00	1.0290	0.3985	19.97
50.00	1.0348	0.5010	19.09
60.00	1.0388	0.6035	18.21
70.00	1.0404	0.7052	17.34
80.00	1.0401	0.8057	16.47
90.00	1.0375	0.9041	15.62
100.00	1.0328	1.0000	14.80

las respectivas densidades y parámetros de solubilidad a 25.00°C . La fracción volumétrica (ϕ) se halla simplemente como el cociente entre el volumen de PG y la suma de los volúmenes de agua y PG suponiendo aditividad de volúmenes (Connors KA., 2002). El parámetro de solubilidad de las mezclas solventes (δ_{mix}) se calcula mediante aligación de acuerdo a:

$$\delta_{mix} = \sum_{i=1}^n \delta_i(\phi)_i \quad [\text{Ec. 14}]$$

en la cual, δ_i es el parámetro de solubilidad de cada componente, en este caso $23.4 \text{ cal}^{1/2} \text{cm}^{-3/2}$ (unidades Hildebrand) para el agua y $14.8 \text{ cal}^{1/2} \text{cm}^{-3/2}$ para el PG a 25.00°C (Martín A et al., 1993).

En la Tabla 2 se presenta la densidad de las soluciones saturadas de ACF y la solubilidad de este fármaco expresada en gramaridad y en fracción molar, mientras que en la Figura 1 se presentan, la solubilidad experimental, la

solubilidad ideal [Ec. 9] y la solubilidad calculada usando el modelo de soluciones regulares [Ec. 4], expresadas en fracción molar, en función del parámetro de solubilidad de las mezclas disolventes. En el caso de la solubilidad experimental, la tendencia puede ser ajustada a un polinomio regular de cuarto grado con un coeficiente de determinación de 0.9993 (Figura 1).

A partir de los valores de densidad de las mezclas solventes (Tabla 1) y de las soluciones saturadas (Tabla 2), junto con la solubilidad gramar (Tabla 2), se calcularon la fracción volumétrica del solvente (ϕ_1) y el volumen molar del soluto (V_2) en las soluciones saturadas por medio de la Ec. 13, usando la masa molar del ACF: $151.16 \text{ g mol}^{-1}$ (Budavari S et al., 2001). Estos valores se presentan también en la Tabla 2.

Tradicionalmente en la literatura se ha asumido como una constante al valor del volumen molar del soluto en la solución (Martín A & Bustamante P., 1989; Martín A et al., 1993). Valor que en el caso de solutos sólidos (a causa

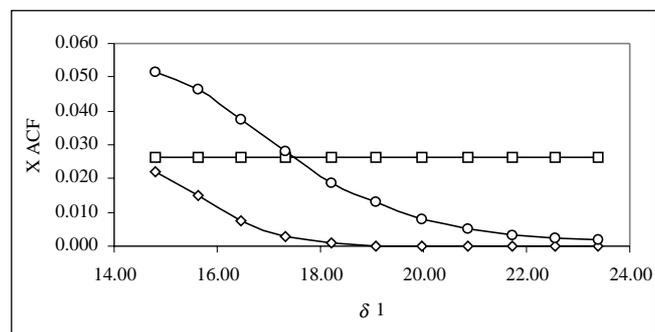


Figura 1. Solubilidad experimental (círculos), ideal (cuadrados) y calculada según el modelo de soluciones regulares de Hildebrand (rombos) del ACF en función del parámetro de solubilidad ($\text{cal}^{1/2} \text{cm}^{-3/2}$) de las mezclas solventes agua-PG a 25.00°C .

Tabla 2. Densidad de las mezclas agua-PG saturadas de ACF (g cm^{-3}), solubilidad gramar y en fracción molar de ACF en las mezclas, fracción volumétrica del solvente en la solución saturada y volumen molar de ACF en las mezclas ($\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}$) a 25.00°C .

δ_i	$\rho_{\text{soln sat}}$	ACF/ g/100 mL	X_2	ϕ_1	V_2
23.40	0.9998	1.53	0.00185	0.98746	123.87
22.56	1.0080	1.82	0.00237	0.98556	119.91
21.71	1.0172	2.46	0.00347	0.98006	122.55
20.85	1.0271	3.37	0.00522	0.97268	122.53
19.97	1.0362	4.67	0.00803	0.96161	124.25
19.09	1.0441	6.65	0.01294	0.94472	125.65
18.21	1.0508	8.33	0.01858	0.93136	124.55
17.34	1.0555	10.69	0.02803	0.91176	124.77
16.47	1.0576	11.91	0.03739	0.90232	123.98
15.62	1.0564	11.98	0.04643	0.90275	122.71
14.80	1.0516	10.26	0.05161	0.91886	119.54

de la gran dificultad en su determinación experimental), en la mayoría de los casos es calculado por métodos de contribución de grupos, dentro de los cuales el más popular es el desarrollado por Fedors (**Fedors RF.**, 1974; **Reillo A et al.**, 1993). Sin embargo como se aprecia en la Tabla 2, esta propiedad para el ACF no es constante sino que depende de la composición del medio solvente. En segundo lugar, la fracción volumétrica del solvente en la solución saturada tradicionalmente se ha calculado según la expresión:

$$\phi_1 = \frac{V_1(1-X_2)}{V_1(1-X_2)+V_2X_2} \quad [\text{Ec. 15}]$$

donde el término V_1 es el volumen molar del solvente. En el caso de mezclas solventes esta última propiedad se ha calculado por el método de aditividad lineal de volúmenes como:

$$V_{i,mix} = \sum_{i=1}^n V_{i,i} \phi_i \quad [\text{Ec. 16}]$$

Sin embargo como es bien sabido, en el caso de mezclas cosolventes con fuerte presencia de enlaces de hidrógeno y grandes diferencias en los volúmenes molares de los componentes, los volúmenes de mezcla no son aditivos. Por lo tanto resulta más práctico hallar las fracciones volumétricas a partir de lo indicado previamente en la metodología, usando las Ecs. 11 a 13, para lo cual como se indicó anteriormente, solo se requiere de las densidades de las mezclas disolventes puras y saturadas de ACF y de las composiciones.

En la Tabla 3 se presenta el coeficiente de actividad del ACF en las diferentes mezclas, calculado mediante la Ec. 9, utilizando un valor de solubilidad ideal igual a 0.02602 a 25.00 °C (**Baena Y et al.**, 2004). En todos los casos por debajo del 60 % p/p de PG g_2 es mayor que la

unidad puesto que la solubilidad experimental es menor que la ideal, mientras que a mayores proporciones de PG en la mezcla solvente, el comportamiento es inverso.

Romero S et al., (2004) han demostrado recientemente mediante técnicas calorimétricas, espectroscópicas y cristalográficas que el acetaminofén como sólido en exceso mantiene sus propiedades cristalinas originales en soluciones saturadas en mezclas solventes de diferentes polaridades y diferentes características ácido-base de Lewis, por lo cual se puede considerar que la solubilidad ideal del fármaco [Ec. 2] es invariante con la composición disolvente en el sistema agua-PG ya que las propiedades de fusión permanecen inalteradas.

Adicionalmente en la Tabla 3 se presentan los factores A y W calculados usando las Ecs. 6 y 8, respectivamente. Para el cálculo del parámetro W se utilizó como valor del parámetro de solubilidad del ACF, el correspondiente a la mezcla solvente en la cual se obtuvo la máxima solubilidad en el sistema agua-etanol, esto es, 14.8 cal^{1/2} cm^{-3/2} (**Bustamante P et al.**, 1995; **Romero S et al.**, 1996). Esto se hizo así ya que en el sistema agua-PG no se obtiene un máximo de solubilidad en mezcla solvente sino que este valor se obtiene en PG puro (expresando la solubilidad en la escala de fracción molar).

Como se indicó anteriormente, el factor W responde por las desviaciones presentadas por las soluciones reales respecto a las soluciones regulares, debido principalmente a interacciones específicas de tipo unión de hidrógeno, presentes en estos sistemas estudiados. El fármaco y los dos solventes considerados pueden fácilmente establecer estas uniones, ya sea como donores o como aceptores de hidrógeno, debido a los grupos OH, si bien en el caso el ACF, también por el grupo amido.

Tabla 3. Coeficiente de actividad del ACF, factor A (cm³ cal⁻¹), factor W experimental y calculado (cal cm⁻³) utilizando modelos polinómicos regulares de órdenes 1, 2, 3 y 4 en mezclas agua-PG a 25.00°C.

δ_1	$-\log \gamma_2$	A	W_{expt}	$W_{\text{calculado}}$			
				Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4
23.40	1.14832	0.088527	362.514	356.792	362.095	362.450	362.457
22.56	1.04102	0.085371	343.684	341.725	343.899	343.835	343.827
21.71	0.87441	0.086279	325.887	326.403	326.086	325.827	325.819
20.85	0.69784	0.084971	308.448	310.826	308.690	308.414	308.413
19.97	0.51041	0.084212	291.643	295.042	291.798	291.629	291.634
19.09	0.30326	0.082194	275.621	279.169	275.556	275.558	275.565
18.21	0.14622	0.079188	260.099	263.284	260.051	260.222	260.227
17.34	-0.03238	0.076022	245.696	247.531	245.414	245.690	245.688
16.47	-0.15747	0.073984	231.937	231.959	231.667	231.924	231.916
15.62	-0.25152	0.073297	219.003	216.706	218.901	218.961	218.954
14.80	-0.29745	0.073976	206.750	201.846	207.128	206.773	206.781

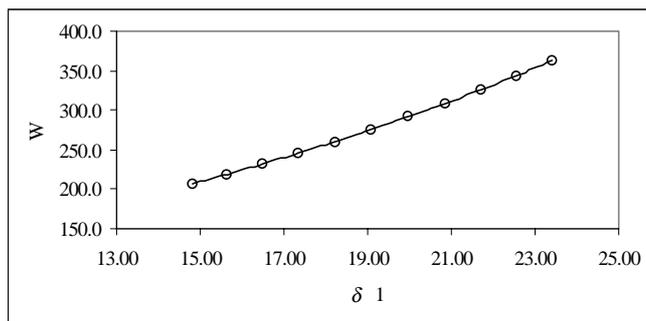


Figura 2. Variación del factor W (cal cm^{-3}) en función del parámetro de solubilidad ($\text{cal}^{1/2} \text{cm}^{-3/2}$) de las mezclas solventes agua-PG a 25.00°C .

En la Figura 2 se presenta la variación del factor W con el parámetro de solubilidad de las mezclas solventes, donde puede observarse un comportamiento que se desvía ligeramente de la linealidad. En la Tabla 3 se presentan los valores calculados o normalizados del factor W , obtenidos utilizando modelos de primer, segundo, tercer y cuarto grado. Donde es bien claro que estos valores dependen del tipo de modelo polinómico regular utilizado en la regresión. Una situación similar ha sido descrita por **Martín A et al.**, (1993) en el estudio de la solubilidad de la cafeína en mezclas agua-dioxano al comparar los resultados obtenidos con polinomios de segundo y de cuarto orden. En este punto es de resaltar que se debe considerar un adecuado número de cifras significativas en los coeficientes de los polinomios (en particular aquellos que implican altas potencias, esto es, de orden tres o cuatro), ya que se pueden presentar diferencias bastante significativas en el resultado final de los valores W por un manejo numérico inadecuado en el planteamiento de los correspondientes polinomios (especialmente, cuando se usa menos de seis cifras significativas).

En la Tabla 4 se presentan los valores de solubilidad obtenidos por retro-cálculo utilizando los diferentes valores del factor W obtenidos mediante las regresiones polinómicas de diferente orden que han sido presentados en la Tabla 3. Adicionalmente, en la Tabla 4 se presentan los porcentajes de diferencia entre la solubilidad experimental y la calculada usando los diferentes modelos de regresión para el factor W . Puede observarse que en la medida en que se va haciendo más complejo el polinomio se van obteniendo mejores concordancias entre los valores calculados y los experimentales, lo que se confirma plenamente al verificar los porcentajes de desviación promedio, los cuales son: 120.0, 8.03, 2.06 y 2.09%, para los órdenes, 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Es de resaltar que la mejoría más notable se presenta al pasar del orden 1 al 2, mientras que en el paso del orden 3 al 4 no hay cambios significativos; sin embargo para los cálculos siguientes se utilizará el modelo de cuarto grado como se ha hecho tradicionalmente en la literatura (**Martín A et al.**, 1993) y además para poder comparar con los valores obtenidos directamente al relacionar X_2 en función de d_1 (Tabla 2 y Figura 1).

Una reflexión que podría surgir respecto a la concordancia obtenida al comparar la solubilidad experimental con la calculada a partir de modelos de regresión construidos sobre datos experimentales directos o procesados, es la relativa a la justificación de cálculos complejos involucrando otras variables del sistema (Ec. 7 y Tablas 3 y 4), en lugar de la simple regresión de solubilidad en función del parámetro de solubilidad de la mezcla solvente (Tabla 2 y Figura 1). Por lo tanto, en la Tabla 5 se comparan las solubilidades experimentales, las calculadas directamente por regresión en el polinomio regular de cuarto grado de la Figura 1 [Ec. 17], y las calculadas indi-

Tabla 4. Solubilidad calculada utilizando factor W obtenido por modelos de regresión de órdenes 1, 2, 3 y 4 y porcentaje de diferencia respecto al valor experimental en mezclas agua-PG a 25.00°C .

δ_1	X_2 calculado				% desv. (a)			
	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4
23.40	0.00018	0.00156	0.00180	0.00181	90.30	15.72	2.60	2.29
22.56	0.00110	0.00258	0.00251	0.00250	53.70	8.81	6.10	5.79
21.71	0.00427	0.00376	0.00339	0.00338	22.78	8.23	2.34	2.64
20.85	0.01323	0.00573	0.00515	0.00515	153.53	9.91	1.33	1.38
19.97	0.03001	0.00853	0.00799	0.00801	273.60	6.18	0.55	0.35
19.09	0.04957	0.01263	0.01264	0.01267	283.00	2.43	2.38	2.09
18.21	0.05936	0.01826	0.01943	0.01947	219.46	1.76	4.58	4.78
17.34	0.05330	0.02539	0.02797	0.02796	90.12	9.42	0.22	0.27
16.47	0.03767	0.03411	0.03723	0.03713	0.73	8.78	0.45	0.71
15.62	0.02138	0.04487	0.04579	0.04568	53.95	3.37	1.39	1.63
14.80	0.00971	0.05869	0.05201	0.05215	81.19	13.71	0.77	1.04

(a) Calculado como $100 \cdot |X_2 \text{ expt} - X_2 \text{ calc}| / X_2 \text{ expt}$

rectamente involucrando el parámetro W obtenido del polinomio de cuarto grado (Ec. 18 y Tabla 4). En los dos casos se utilizó notación científica y se consideraron siete cifras significativas en los coeficientes de los polinomios. Se presentan adicionalmente en esta tabla los respectivos porcentajes de diferencia, respecto al valor experimental.

$$X_{ACF} = -3.319577 \cdot 10^{-5} \delta_1^4 + 2.584345 \cdot 10^{-3} \delta_1^3 - 7.403771 \cdot 10^{-2} \delta_1^2 + 9.183199 \cdot 10^{-1} \delta_1 - 4.107202 \cdot 10^0 \quad r^2 = 9.993259 \cdot 10^{-1} \text{ [Ec. 17]}$$

$$W = 1.943569 \cdot 10^{-4} \delta_1^4 + 7.088163 \cdot 10^{-4} \delta_1^3 + 1.200375 \cdot 10^{-2} \delta_1^2 + 1.116296 \cdot 10^1 \delta_1 + 2.731688 \cdot 10^1 \quad r^2 = 9.999980 \cdot 10^{-1} \text{ [Ec. 18]}$$

En principio, en la Tabla 5 puede observarse que si hay diferencias significativas entre los valores calculados por los dos métodos, lo que se verifica mediante los promedios de desviación, los cuales son 6.80 y 2.09 % para los cálculos directo y por el Método Extendido de Hildebrand. Este resultado demuestra la practicidad de este último método, el cual si bien implica experimentación adicional (entre la que se destaca la determinación de densidades y de algunas propiedades relativas a la fusión del soluto), considera a la solubilidad desde un enfoque fisicoquímico sistemático y muy racional. Además, en un tratamiento más detallado presentado por **Hansen CM. & Beerbower A.** (1971), el parámetro de solubilidad se ha dividido en tres sub-parámetros, debidos a interacciones débiles o de dispersión (δ_D), a interacciones polares (δ_P) y a unión de hidrógeno (δ_H), los cuales se relacionan al parámetro de Hildebrand mediante la expresión:

$$\delta^2 = \delta_D^2 + \delta_P^2 + \delta_H^2 \text{ [Ec. 19]}$$

Este tratamiento permite observar la influencia de los diferentes tipos de interacciones intermoleculares presen-

tes en el proceso de solución, en particular sobre las interacciones soluto-solvente. De otro lado, un tratamiento más completo ha sido realizado recientemente por la Prof. Pilar Bustamante y otros investigadores (**Escalera JB et al.**, 1994; **Reillo A et al.**, 1995; **Romero S et al.** 1996; **Bustamante P et al.**, 1998a y 1998b; **Bustamante P et al.**, 2000). En este método, el sub-parámetro por unión de hidrógeno (δ_H), a su vez se ha subdividido en dos términos, uno debido al carácter ácido (δ_{Ha} donador de hidrógeno) y otro, debido al carácter básico (δ_{Hb} aceptor de hidrógeno), lo que a su vez permite un análisis mucho más completo puesto que permite evaluar el carácter ácido o básico de Lewis en las interacciones intermoleculares presentes.

El tratamiento matemático realizado en estos dos métodos más detallados, es similar al realizado en este trabajo, solo que se evalúa simultáneamente el efecto de cada uno de los sub-parámetros de solubilidad del solvente (obtenidos individualmente por aligación) sobre la solubilidad del soluto. Esto lleva necesariamente a la obtención de modelos de regresión de la solubilidad u otro parámetro dependiente de esta propiedad, en función de tres o cuatro variables (sub-parámetros de solubilidad), según el caso; lo cual a su vez permite verificar el efecto de cada tipo de interacción intermolecular en particular, con base en los valores obtenidos para los coeficientes de los diferentes términos de los polinomios multivariados obtenidos. Además, el método de Bustamante et al. (utilizado principalmente en el estudio de analgésicos no esteroideos y sulfonamidas), ha demostrado poseer un carácter mucho más predictivo que los anteriores, requiriendo de un menor número de experimentos, en particular, en lo relativo a los ensayos de solubilidad.

Tabla 5. Comparación de los valores de solubilidad del ACF calculados directamente y mediante el método extendido de Hildebrand en mezclas agua-PG a 25.00°C.

δ_1	X_2			% desv.	
	Expt	Calc. direct.	Calc. W	Calc. direct.	Calc. W (a)
13.00	0.00185	0.00154	0.00181	16.78	2.29
13.14	0.00237	0.00294	0.00250	24.13	5.79
13.29	0.00347	0.00361	0.00338	3.99	2.64
13.44	0.00522	0.00486	0.00515	6.76	1.38
13.61	0.00803	0.00767	0.00801	4.58	0.35
13.78	0.01294	0.01255	0.01267	3.06	2.09
13.97	0.01858	0.01954	0.01947	5.16	4.78
14.16	0.02803	0.02812	0.02796	0.32	0.27
14.36	0.03739	0.03734	0.03713	0.13	0.71
14.57	0.04643	0.04581	0.04568	1.35	1.63
14.80	0.05161	0.05194	0.05215	0.63	1.04

(a) Calculado como $100 \cdot |X_2 \text{ expt} - X_2 \text{ calc}| / X_2 \text{ expt}$

Conclusiones

De lo descrito anteriormente se puede concluir que en el sistema solvente agua-propilenglicol no se puede obtener un valor para el parámetro de solubilidad del ACF ya que a diferencia del sistema agua-etanol, aquí no se obtiene un máximo de solubilidad en ninguna mezcla sino que este es obtenido en el PG puro. La solubilidad experimental de este fármaco es mayor o menor que la solubilidad ideal, lo que a su vez conduce a coeficientes de actividad menores o mayores que la unidad, dependiendo de la composición del medio solvente; lo anterior está en concordancia con lo encontrado para este fármaco en el sistema agua-etanol y en el estudio del comportamiento de otros fármacos. Adicionalmente, en esta investigación se ha aplicado satisfactoriamente el Método Extendido de Solubilidad de Hildebrand al estudio de la solubilidad del ACF en mezclas agua-PG, utilizando para este fin, un desarrollo experimental y de cálculo sencillos para la estimación del volumen molar del soluto y de la fracción volumétrica del solvente en la solución saturada. Este desarrollo implica conocer adicionalmente la densidad de la solución saturada y de la mezcla solvente. En particular, se ha encontrado una buena capacidad predictiva utilizando un modelo polinómico de cuarto orden del parámetro de interacción *W* en función del parámetro de solubilidad de las mezclas solventes.

Agradecimientos

Muy formalmente agradezco a la Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología del Banco de la República y a la DIB-DINAIN de la Universidad Nacional de Colombia (UNC) por el apoyo financiero, a Industria Química Andina de Colombia por la donación del acetaminofén USP y al Departamento de Farmacia de la UNC por facilitar los equipos e instalaciones requeridos para el desarrollo de esta investigación.

Bibliografía

- Anton Paar KG.** 1980. "DMA 45: Calculating Digital Density Meter Instruction Manual", Graz, Austria, pp. 1-12.
- Ávila CM, & F. Martínez.** 2002. Thermodynamic study of the solubility of benzocaine in some organic and aqueous solvents. *J. Solution Chem.* **31** (12): 975-85.
- Baena Y, Pinzón JA, Barbosa H. & F. Martínez.** 2004. Temperature dependence of the solubility of some acetanilide derivatives in several organic and aqueous solvents. *Phys. Chem. Liquids* **42** (6): 603-13.
- Budavari S, O'Neil MJ, Smith A, Heckelman PE, Obenchain Jr. JR, Gallepeau JAR & MA. D'Arecea.** 2001. "The Merck Index, An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals," 13th edition, Merck & Co., Inc., Whitehouse Station, NJ, p. 10.
- Bustamante P, Romero S. & A. Reillo.** 1995. Thermodynamics of paracetamol in amphiprotic and amphiprotic-aprotic solvent mixtures. *Pharm. Sci.* **1**: 505-7.
- Bustamante P, Peña MA. & J. Barra.** 1998a. Partial-solubility parameters of naproxen and sodium diclofenac. *J. Pharm. Pharmacol.* **50**: 975-82.
- . 1998b. Partial solubility parameters of piroxicam and niflumic acid. *Int. J. Pharm.* **174**: 141-50.
- . 2000. The modified extended Hansen method to determine partial solubility parameters of drugs containing a single hydrogen bonding group and their sodium derivatives: benzoic acid/Na and ibuprofen/Na. *Int. J. Pharm.* **194**: 117-24.
- Cárdenas CA, & CC. Guevara.** 2003. "Solubilidad y volúmenes de desplazamiento de acetaminofén en mezclas agua-propilenglicol y etanol-propilenglicol a 25.0°C", Trabajo de Grado, Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- Connors KA.** 2002. "Thermodynamics of Pharmaceutical Systems: An Introduction for Students of Pharmacy", Wiley-Interscience, Hoboken NJ, p. 61-6.
- Escalera JB, Bustamante P, & A. Martin.** 1994. Predicting the solubility of drugs in solvent mixtures: Multiple solubility maxima and the chameleonic effect. *J. Pharm. Pharmacol.* **46**: 172-76.
- Fedors RF.** 1974. A method for estimating both the solubility parameters and molar volumes of liquids. *Polym. Eng. Sci.* **14**: 147-54.
- Ferro V, & A. Ávila.** 1986. "Perfiles de solubilidad en diferentes sistemas solventes para algunos derivados de la anilina con acción antipirética-analgésica", Tesis de Grado, Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia.
- Fonseca JC, & YP. Coronado.** 1998. "Determinación de la solubilidad de acetaminofén en sistemas ternarios. Parte II: Sistemas agua-alcohol-poliol", Trabajo de Grado, Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia.
- Hansen CM, & A. Beerbower.** 1971. *Encyclopedia of Chemical Technology*, Suppl. 2nd edition, Editado por Standen A. John Wiley & Sons, New York, p. 889-910.
- Hildebrand JH, Prausnitz JM, & RL. Scott.** 1970. "Regular and Related Solutions", Van Nostrand Reinhold, New York.
- Jiménez F, & F. Martínez.** 1995. Una estrategia para la selección sistemática de vehículos en el diseño de formas farmacéuticas líquidas homogéneas. *Rev. Col. Cienc. Quím. Farm.* **24**: 19-23.
- Lund W.** 1994. "The Pharmaceutical Codex: Principles and Practice of Pharmaceutics", 12th edition, The Pharmaceutical Press, London, pp. 987-93.
- Martin A, Newburger J, & A. Adjei.** 1980. Extended Hildebrand approach: solubility of caffeine in dioxane-water mixtures. *J. Pharm. Sci.* **69** (6): 659-61.

- _____, **Wu PL.** 1981. Extended Hildebrand solubility approach: p-Hydroxibenzoic acid in mixtures of dioxane and water. *J. Pharm. Sci.* **72**(6), 587-92.
- _____, **Miralles MJ.** 1982. Extended Hildebrand solubility approach: Solubility of tolbutamide, acetohexamide, and sulfisomidine in binary solvent mixtures. *J. Pharm. Sci.* **71** (4), 439-42.
- _____, **Wu PL, Adjei A, Mehdizadeh M, James KC, & C. Metzler.** 1982. Extended Hildebrand solubility approach: Testosterone and testosterone propionate in binary solvents. *J. Pharm. Sci.* **71** (12): 1334-40.
- Martín A, & P. Bustamante.** 1989. El parámetro de solubilidad en las ciencias farmacéuticas. *Anal. Real Acad. Farm.* **55**: 175-202.
- _____, **Chun AHC.** 1993. "Physical Pharmacy: Physical Chemical Principles in the Pharmaceutical Sciences", 4th edition, Lea & Febiger, Philadelphia, pp. 221-9.
- Martínez F, & JH. Rojas.** 1999. Un método refracto-densimétrico para el análisis de mezclas líquidas ternarias homogéneas. *Rev. Col. Cienc. Quím. Farm.* **28**: 45-51.
- _____, **Gómez A, & CM. Ávila.** 2002. Volúmenes molales parciales de transferencia de algunas sulfonamidas desde el agua hasta la mezcla agua-etanol (X = 0.5). *Acta Farm. Bonaerense* **21** (2): 107-18.
- Parrot EL, & W. Sasaki.** 1977. "Experimental Pharmaceutics", 4th edition, Burgess Publishing Company, Minnesota, pp. 97-9.
- Pérez DC.** 2003. "Volúmenes de desplazamiento del acetaminofén en mezclas agua-etanol a 25 °C", Trabajo de Grado, Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia.
- _____, **Guevara CC, Cárdenas CA, Pinzón JA, Barbosa HJ, & F. Martínez.** 2003. Solubilidad y volúmenes de desplazamiento del acetaminofén en mezclas binarias formadas por agua, etanol y propilenglicol a 25.0°C. *Rev. Col. Cienc. Quím. Farm.* **32** (2): 116-36.
- Reillo A, Escalera JB, & E. Selles.** 1993. Utilidad del método de Fedors en el cálculo del parámetro de solubilidad de la sulfanilamida. *Ciencia Pharmaceutica* **3**: 249-52.
- _____, **Bustamante P, Escalera B, Jimenez MM, & E. Selles.** 1995. Solubility parameter-based methods for predicting the solubility of sulfapyridine in solvent mixtures. *Drug Dev. Ind. Pharm.* **21** (18): 2073-84.
- Roberts II LJ, & JD. Morrow.** 2001. Analgesic-antipyretic and antiinflammatory agents and drugs employed in the treatment of gout. En: "Goodman & Gilman's. The Pharmacological Basis of Therapeutics", 10th edition, International Edition, Editado por Hardman JG, Limbird LE y Gilman AG, McGraw-Hill, New York, pp. 703-5.
- Rodríguez S, Vargas RA, Pinzón JA, Barbosa HJ, & F. Martínez.** 2002. Aplicación del método de Bakhuis-Rooseboom para el cálculo de volúmenes específicos parciales en sistemas ternarios. *Rev. Col. Cienc. Quím. Farm.* **31**: 11-8.
- Romero S, Reillo A, Escalera B, & P. Bustamante.** 1996. The behavior of paracetamol in mixtures of amphiprotic and amphiprotic-aprotic solvents: Relationship of solubility curves to specific and nonspecific interactions. *Chem. Pharm. Bull.* **44**(5): 1061-64.
- _____, **Bustamante P, Escalera B, Cirri M, & P. Mura.** 2004. Characterization of the solid phases of paracetamol and phenamates at equilibrium in saturated solutions. *J. Thermal Anal. Calorimetry* **77**: 541-54.
- Rosenstein-Ster E.** 2004. "Diccionario de Especialidades Farmacéuticas", 32ª edición, Thompson P.L.M., S.A., Bogotá.
- USP23-NF18.** 1994. "The United States Pharmacopeia", 23rd edition, The United States Pharmacopeial Convention, Rockville, MD, pp. 16-7.
- Vargas RA, Pinzón JA, Barbosa HJ, & F. Martínez.** 2000. Uso de los volúmenes específicos parciales en el diseño de medicamentos líquidos homogéneos. *Rev. Col. Cienc. Quím. Farm.* **29**: 57-64.
- Yalkowsky SH.** 1999. "Solubility and Solubilization in Aqueous Media", American Chemical Society and Oxford University Press, New York, pp. 20-80.

Recibido el 20 de septiembre de 2004

Aceptado para su publicación el 18 de junio de 2005

GASTRÓPODOS DE LA REGIÓN SUBXEROFÍTICA DE LA HERRERA, MOSQUERA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA

por

Mónica Lucía Vera-Ardila¹ & Edgar L. Linares²

Resumen

Vera-Ardila, M. L. & E. L. Linares. Gastrópodos de la región subxerofítica de La Herrera, Mosquera, Cundinamarca, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **29** (112): 439-456. 2005. ISSN 0370-3908.

La región subxerofítica de La Herrera está siendo degradada por diversas actividades antrópicas que afectan los microhábitats ocupados por macro y micromoluscos. A pesar de esta situación, en 8 hábitats (6 terrestres y 2 acuáticos) se registraron 15 especies de gastrópodos comprendidos en 11 familias: Helicidae, Charopidae, Limacidae, Orthalicidae, Physidae, Planorbidae, Punctidae, Succineidae y Vertiginidae. La familia con el mayor número de especies fue la familia Orthalicidae con el 26.7% del total de especies. Se presenta, por primera vez para el país, la descripción anatómica de 4 especies de caracoles terrestres (*Deroceras reticulatum*, *Pupisoma dioscoricola*, *Paralaoma servilis* y *Radiodiscus* sp.), además de algunos comentarios sobre la situación de cada una de las mismas.

Palabras clave: Gastrópodos, región subxerofítica de La Herrera, hábitats, anatomía interna.

Abstract

The subxerophytic region of La Herrera is being degraded at present for diverse anthropic activities that affect the microhabitats occupied by macro and micromollusks. In spite of this situation, in La Herrera in 8 habitats (6 terrestrial and 2 aquatic) are registered 15 gastropods species in 11 families: Charopidae, Helicidae, Limacidae, Orthalicidae, Physidae, Planorbidae, Punctidae, Succineidae and Vertiginidae. The largest family was the family Orthalicidae with 26.7% of the total of species. It is presented for the first time for the country the description of the anatomy of 4 species of terrestrial snails (*Deroceras reticulatum*, *Pupisoma dioscoricola*, *Paralaoma servilis* and *Radiodiscus* sp.), is given with some comments about each of them.

Key words: Gastropods, La Herrera subxerophytic region, habitats, internal anatomy.

¹ Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Bogotá, Colombia. moluskum@yahoo.com

² ellinaresc@unal.edu.co

Introducción

El conocimiento sobre moluscos terrestres en nuestro país es fragmentario y pobre, y en general se deriva de colecciones realizadas por naturalistas europeos o estadounidenses entre 1850 y 1950, que se encuentran depositadas en museos de esas latitudes. Se conocen unos cuantos estudios en la última década del siglo XX y comienzos de este, dentro de los cuales se encuentran los trabajos de **Malek & Cogswell** (1980) que registran la capacidad de *Lymnaea bogotensis* como vector de *Fasciola hepatica*, **Restrepo et al.** (1983) que presentan descripciones de moluscos terrestres recolectados en un bosque seco en el Valle del Cauca y Cauca, **Soler** en el mismo año realiza un trabajo sobre moluscos dulceacuícolas como indicadores de la calidad del agua, **Gómez & Velásquez** (1999) sobre moluscos dulceacuícolas bioindicadores en el departamento de Antioquia y **Velásquez & Escobar** (2001) que registran a *Physa cubensis* en los humedales y cunetas de la Sabana de Bogotá. El trabajo más reciente lo presenta **Hausdorf** (2002) quien registra 7 especies de moluscos para la región de La Herrera.

La región subxerofítica de la Herrera es un enclave subxerofítico que se encuentra localizado en el límite sudoccidental de la Sabana de Bogotá, y se extiende desde el valle bajo del río Tunjuelo hasta cerca de Bojacá en un rango altitudinal de 2500 a 2900 m (**Pinzón, 2000**). Esta zona fue elegida como área de estudio debido al interés que hay en el desarrollo de trabajos que permitan ampliar el conocimiento en áreas secas alto-andinas. La Herrera, actualmente, es considerada un reducto de flora y fauna del altiplano (**Castellanos, 2000**) que actúa como isla biogeográfica y refugio de plantas y animales dependientes de los microclimas que ofrecen los hábitats aún existentes allí.

Actualmente la región está siendo degradada por diversas actividades antrópicas que afectan el suelo y la estructura de la vegetación natural con la consecuente destrucción de microhábitats utilizados como refugios por diversas especies tanto de plantas como de animales; dentro de estas actividades se pueden mencionar: la explotación de canteras, los cultivos y plantaciones de especies exóticas, la acumulación de desechos sólidos, la contaminación de las aguas, la ganadería y el sobrepastoreo (**Pinzón, 2000; Vera-Ardila, 2003**).

Este trabajo es una primera aproximación al conocimiento de los gastrópodos terrestres y dulceacuícolas colombianos en una zona subxerofítica de clima frío, con base en descripciones de la concha y disecciones de los órganos internos, tales como rádula y complejo peneal; se presentan además ilustraciones de cada una de las especies encontradas.

Métodos

El estudio se llevó a cabo en el año 2003, principalmente en el sector ubicado entre las cuchillas Las Catedras y Mondoñedo y en la laguna de La Herrera (Fig. 1), pertenecientes a la región Subxerofítica de La Herrera en un rango altitudinal comprendido entre los 2550 y 2900 m, entre los 04 37'-04 42' N y los 74 14'-74 19' W (**Pinzón, 2000**). Las zonas de recolección se definieron por su accesibilidad y abarcaron todos los tipos de vegetación de acuerdo con la caracterización de ambientes hecha por **Pinzón** (2000), que se resume en:

Rocas: afloramientos rocosos dispersos con rocas solitarias o en grupos que forman conglomerados; en la superficie expuesta se observan líquenes y en las paredes protegidas de la radiación se observan musgos y pequeños arbustos.

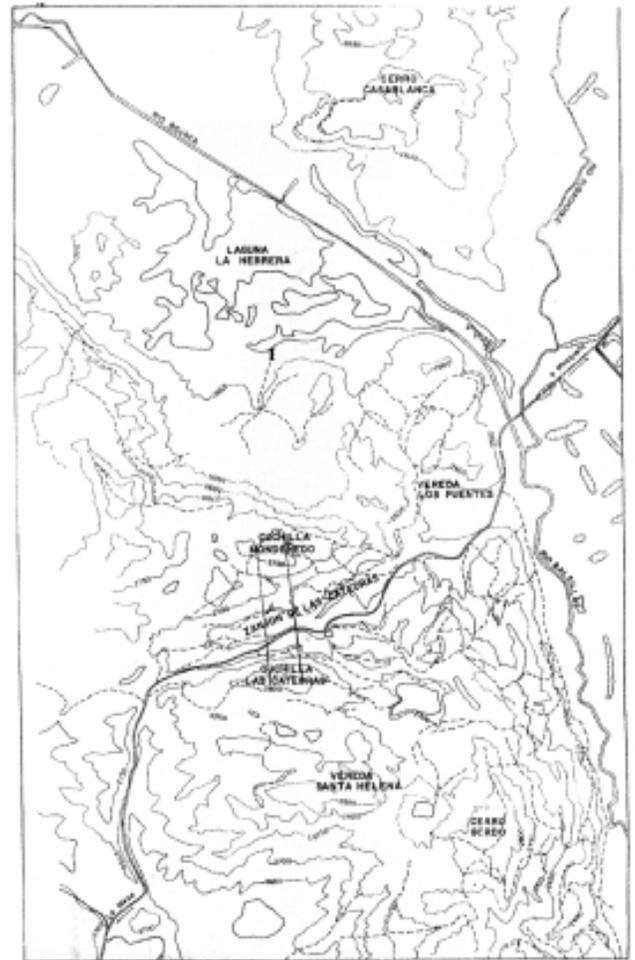


Figura 1. Área de estudio. A. Cuchilla de las Catedras y de Mondoñedo, B. Laguna de la Herrera.

Prados: cobertura de cerca del 60%, (pastizales cortos) con dominio de *Pennisetum clandestinum* (Poaceae) y *Selaginella sellowii* (Selaginellaceae); ocupa extensas áreas planas y semiplanas, en las que dominan plantas vasculares herbáceas de porte pequeño (entre 10 y 20 cm de alto).

Matorrales: cobertura de cerca del 80%; se encuentran conformados por arbustos pequeños (1-1.50 m de altura) dominados por *Lycianthes lycioides* (Solanaceae), *Baccharis floribunda* y *Eupatorium baccharoides* (Asteraceae) entre otros. Se presentan grupos de cardonales dominados por *Opuntia schumannii* (Cactaceae). Se definen dos tipos de matorrales, el matorral cerrado en el cual los conjuntos de plantas se encuentran a menos de un metro unos de otros, mientras que en el matorral abierto estos se encuentran a más de un metro de distancia.

Cañadas: cobertura vegetal de cerca del 60%; estas son zanjas de 1 a 4 metros de profundidad, cubiertas de vegetación arbustiva, dominada por *Baccharis latifolia* y *Duranta coriacea*, y en el fondo con tapetes de briófitos; ambiente muy húmedo.

Bosque exótico: cobertura del 80% de árboles de cerca de 5m., zona inclinada con monocultivo de *Acacia melanoxylon* y *Pinus radiata*.

Los ambientes acuáticos fueron:

Pantanos temporales: zonas planas con espejos de agua dispersos, la zona plana está dominada por *Pennisetum clandestinum*, y los espejos de agua (aprox. 4 m de diámetro) están cubiertos por *Azolla filiculoides*.

Laguna: cobertura vegetal de cerca del 80%; espejo de agua muy reducido. De acuerdo con **Wijninga et al.** (1989), la vegetación acuática se encuentra constituida por comunidades Helofíticas (plantas enraizadas) y Pleustofíticas (plantas flotantes). Las comunidades helofíticas son dominadas por juncos como *Scirpus californicus* y *Typha angustifolia*, las comunidades pleustofíticas están compuestas por *Limnobium laevigatum* y *Azolla filiculoides*, entre otras.

Se hicieron recolecciones de moluscos terrestres (macromoluscos y micromoluscos) y acuáticos (solamente macromoluscos) de acuerdo con **Rangel & Gamboa** (2001) y **Coney et al.** (1981).

Se recolectaron tanto ejemplares vivos como conchas y se tomaron las siguientes medidas con ayuda de un calibrador y reglas milimétricas de acuerdo con su tamaño, según (**Burch & Jung**, 1988) (macromoluscos de 5

o más milímetros y micromoluscos menores de 3 mm): alto y diámetro de la concha, alto y ancho de la abertura (**Breure**, 1977), en el caso de las babosas se tomó el largo total del cuerpo. Se presentan las medidas del espécimen más grande y del más pequeño dentro de su grupo, esto para dar una idea general del tamaño encontrado en cada una de las especies.

Para la extracción de las partes blandas de macromoluscos se utilizaron dos técnicas: con agua caliente (**Rangel & Gamboa**, 2001) o mediante refrigeración (**Pereira de Souza**, 1997); posteriormente se fijaron y conservaron en Raillet Henry (**Pereira de Souza**, 1997). Se realizaron disecciones para obtener el complejo peneal y la rádula de las especies halladas vivas.

Las descripciones se realizaron de acuerdo con los tres caracteres utilizados para la clasificación taxonómica para los animales que tienen concha, que son: concha, aparato radular y complejo peneal. Para la descripción de la concha se utilizaron en su orden los siguientes caracteres: forma de la concha, consistencia de la misma, patrones de color y escultura, protoconcha, sutura, verticilos, abertura, peristoma, ombligo, y labio. Para la descripción del complejo peneal se utilizaron indistintamente caracteres como: largo del flagelo, la presencia o ausencia de bolsa peneal, forma y longitud del pene, y forma del lumen del pene, sitio de inserción del vaso deferente. Para la descripción del aparato radular se tuvo en cuenta el tipo de rádula y de esta, la disposición de los dientes en la cinta, la forma del diente raquidiano, de los dientes laterales, los dientes marginales y su número. Para la descripción de la mandíbula se tuvo en cuenta el número de discos y la forma de los mismos (**Breure**, 1979). En el caso de las babosas, los caracteres utilizados para la descripción fueron: cobertura y textura del manto, posición del pneumostoma, talla del animal, y presencia de concha externa (**Burch**, 1962 y **Bogon**, 1990).

Se realizaron dibujos a tinta de la concha (en vista lateral, apical y basal), rádula, mandíbula y complejo peneal de cada una de las especies encontradas con ayuda de un estereoscopio con cámara lúcida Olympus SZH10 y de un microscopio con cámara lúcida Olympus CH-BI45-2. La clasificación taxonómica sigue a **Vaught et al.** (1989) y a **Fonseca & Thomé** (1993) específicamente para la familia Charopidae.

Cada uno de los ejemplares recolectados se almacenó en la sección malacológica (ICN-Mo) de la Colección Zoológica del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia.

Resultados

En la región subxerófitica de La Herrera se encontraron 733 caracoles pertenecientes a 9 familias, 12 géneros y 15 especies (Tabla 1). Las familias que presentaron el mayor número de especies fueron: Orthalicidae con 4 (26,7% del total de especies), Limacidae, Succineidae y Vertiginidae con 2 cada una (40%), y las familias Charopidae, Helicidae, Physidae, Planorbidae, y Punctidae con 1 cada una (33,3%). Las familias Orthalicidae, Limacidae y Vertiginidae presentaron 2 géneros cada una con 4, 2 y 2 especies respectivamente.

Las especies más abundantes en la región fueron: *Paralaoma servilis* con 202 individuos (27,8%), *Physa cubensis* con 176 (24,2%), *Helix aspersa* con 94 (12,9%), y *Radiodiscus* sp. con 93 (12,8%) individuos. Estas cuatro especies contribuyen con el 77,7% (565) del total de individuos (Tabla 1).

Se presenta por primera vez para el país la descripción del complejo peneal y la rádula de 4 especies de caracoles terrestres (*Deroceras reticulatum*, *Pupisoma dioscoricola*, *Paralaoma servilis* y *Radiodiscus* sp.).

Las familias de moluscos encontradas en La Herrera muestran amplia distribución mundial. Orthalicidae, con los géneros encontrados, tiene un patrón de distribución exclusivamente Sudamericano-Andino (*Plekocheilus*) y Neotropical-Nearctico (*Drymaeus*) (Breure, 1979); La Herrera es la localidad tipo de dos especies de esta familia (*Plekocheilus succineoides* y *P. delicatus*). Helicidae y Limacidae son de origen europeo y han entrado al país por diversas vías, por ejemplo sobre plantas (Limacidae) o con un fin comercial (uso alimenticio), como es el caso

de *Helix aspersa* (Hausdorf, 2002). La familia Punctidae es de origen australiano y se registra su introducción al país sobre plantas de *Eucalyptus* traídas para reforestación (Hausdorf, 2002). Charopidae, Succineidae y Vertiginidae son abundantes y diversas en América y no existen datos sobre su introducción al país.

Physidae y Planorbidae son caracoles que colonizan rápidamente cursos de agua, lo que les permite distribuirse fácilmente y ser abundantes en diferentes regiones de América; es importante señalar que inciden en la salud pública en países como Venezuela y Brasil, ya que son vectores de enfermedades como la schistosomiasis (Barbosa *et al.* 1968). En nuestro país no se han registrado casos de esta enfermedad.

Del total de familias registradas en La Herrera seis son terrestres (Orthalicidae, Charopidae, Helicidae, Limacidae, Punctidae y Vertiginidae), dos son dulceacuícolas (Physidae y Planorbidae) y una es anfibia (Succineidae).

A continuación se presenta la descripción, distribución, referencias, colecciones estudiadas y comentarios de cada una de las especies encontradas con sus correspondientes ilustraciones.

Familia: Helicidae

Helix aspersa (O. F. Müller, 1774)

Fig. 2

Concha globosa generalmente más ancha que alta (heliciforme), dextrógira; sólida con estrías longitudinales; color pardo claro-oscuro, con bandas transversales pardo oscuras interrumpidas por flecos o costillas amarillas muy delicadas, superficie de la concha con estrías finas; protoconcha lisa; sutura bien impresa; espiras

Tabla 1. Número de ejemplares por familia y especie. Categorías: Ma. Macromolusco, Mi. Micromolusco, Te. Terrestre, Du. Dulceacuícola, An. Anfibia.

Familia	Categoría	Especie	No. ejemplares	%
Charopidae	Mi. Te.	<i>Radiodiscus</i> sp.	93	12.8
Helicidae	Ma. Te.	<i>Helix aspersa</i>	94	12.9
Limacidae	Ma. Te.	<i>Deroceras reticulatum</i>	3	0.41
		<i>Lehmania valentiana</i>	2	0.27
Orthalicidae	Ma. Te.	<i>Drymaeus nigrofasciatus</i>	8	1.10
		<i>Plekocheilus succinoides</i>	55	7.57
		<i>Plekocheilus delicatus</i>	29	3.99
		<i>Plekocheilus</i> sp.	7	0.96
Physidae	Ma. Du.	<i>Physa cubensis</i>	176	24.2
Planorbidae	Ma. Du.	<i>Biomphalaria straminea</i>	15	2.06
Punctidae	Mi. Te	<i>Paralaoma servilis</i>	202	27.8
Succineidae	Ma. An.	<i>Succinea kuntziana</i>	6	0.83
		<i>Succinea</i> sp.	12	1.65
Vertiginidae	Mi. Te.	<i>Gastrocopta rupícola</i>	3	0.41
		<i>Pupisoma dioscoricola</i>	21	2.89

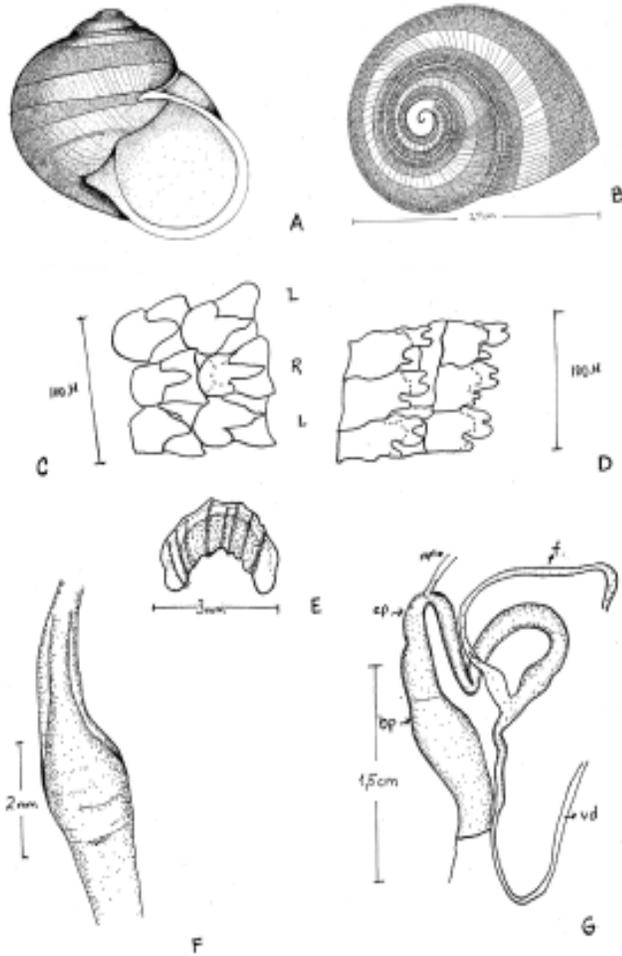


Figura 2. *Helix aspersa* (O.F. Muller, 1774). **A.-** concha vista abertural; **B.-** concha vista apical; **C.-** diente raquidiano (R) y lateral (L); **D.-** dientes marginales; **E.-** mandíbula; **F.-** pene; **G.-** complejo peneal (bp. bolsa del pene, vd. vaso deferente; ep. epifalo; mr. músculo retractor; f. flagelo).

convexas, 4-5 vueltas, última espira amplia; abertura subcircular, peristoma expandido de color blanco, suave, lustroso; columela amplia y fuerte; rimada a imperforada, ombligo cerrado por una extensión del labio.

Complejo peneal compuesto por un flagelo largo que abarca la longitud total del aparato reproductor; pene inmerso en una bolsa ovoide-alargada; vaso deferente se inserta en la parte apical de la bolsa y se conecta al receptáculo seminal por un filamento que se incluye en la glándula de albúmina; en la base del útero se encuentra un par de glándulas multibifurcadas, que son digitiformes, al lado de estas se encuentra la cámara del dardo.

Mandíbula color pardo oscuro, con 7 platos mandibulares con los márgenes protuberantes.

Rádula de tipo Istricoglosa, con una fila de dientes raquidianos (aprox. 30 micras de ancho), de base triangular ápice agudo; 27 filas de dientes laterales, bicúspides y 28 filas de dientes marginales tricúspides (28 micras ancho). Fórmula radular: 28 + 27 + R + 27 + 28.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
25.5	28	17,8	15
26.6	27.4	20.5	16.8

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, afloramientos rocosos al sur de la laguna de La Herrera, 2580 m, número de ejemplares: 94, 1 Feb 2003, *M. Vera-Ardila 012* (ICN-Mo 1142).

Comentarios. Es un macromolusco terrestre, nativo del suroeste europeo, del cual se registra su entrada al país en la década de 1970 con el fin de implementar cultivos alimenticios; estos no prosperaron, fueron abandonados y esta especie se dispersó por la sabana para constituirse en una nueva plaga para la agricultura (Hausdorf, 2002). Anatómicamente este caracol posee una rádula de tipo Istricoglosa característica de gastrópodos herbívoros raspadores, los dientes poseen múltiples cúspides que les permiten ser muy eficientes para el consumo de alimento.

Familia Charopidae

Radiodiscus sp.

Fig. 3

Concha aplanada dorsiventralmente (depresa), delgada; color pardo claro u oscuro, lustrosa; superficie con costillas lamelares longitudinales perpendiculares a la sutura; con escultura débilmente cancelada entre ellas; protoconcha con líneas espiraladas delicadas; sutura bien impresa; 2 1/4 vueltas; abertura circular; peristoma simple; ombligo ancho y profundo.

Cuerpo de color gris-transparente; tentáculos cortos; superficie del manto con manchas de color negro. Complejo peneal (aprox. 500 micras) compuesto por el pene, epifalo y flagelo; epifalo cerca de la mitad de la longitud del pene que está inmerso en la llamada bolsa del pene que está ensanchada en la base y es el doble del ancho del epifalo; el vaso deferente se inserta en el lado lateral superior del epifalo.

Rádula con numerosos dientes, 1 raquidiano agudo; dientes laterales bicúspides agudos; marginales no diferenciados. Fórmula radular: n + R + n.

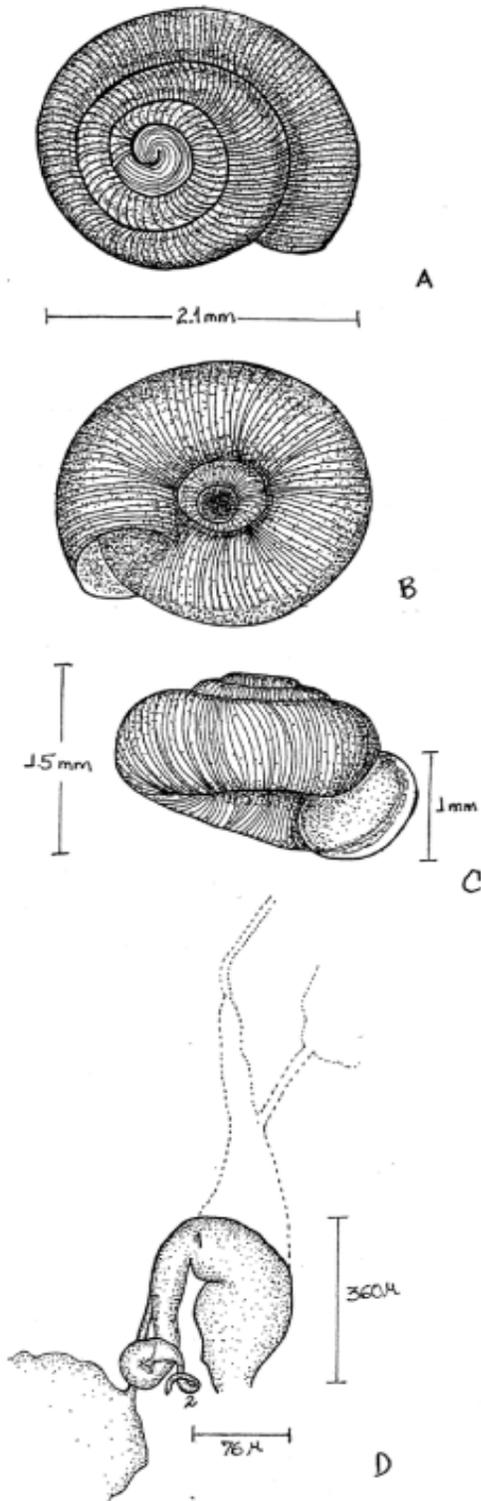


Figura 3. *Radiodiscus* sp. **A.**- concha vista apical; **B.**- vista ventral; **C.**- vista abertural; **D.**- complejo peneal (1. pene; 2. flagelo).

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	diámetro	largo	ancho
1	1.8	0.9	0.8
1.1	2	0.9	0.8

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Región subxerofítica de La Herrera, Cerros de Mondoñedo, matorral cerrado, 2632 m, número de ejemplares: 4, 22 Feb 2003, *M. Vera-Ardila 024* (ICN-Mo 1154), Cuchilla de las Cátedras, matorral cerrado, 2781 m, número de ejemplares: 12, 22 Mar 2003, *M. Vera-Ardila 029* (ICN-Mo 1159.), Cuchilla de las Cátedras, bosque exótico, 2691 m, número de ejemplares: 7, 1 May 2003, *M. Vera-Ardila 037* (ICN-Mo 1167), Cerros de Mondoñedo, cañada, número de ejemplares: 85, 27 Jun 2003, *M. Vera-Ardila 042* (ICN-Mo 1176).

Comentarios. Micromolusco terrestre, la determinación del género se logró mediante comparación con las descripciones hechas por **Pilsbry** (1921) para *Radiodiscus mariae* y por **Fonseca et al.** (1994) para *Radiodiscus thomei*. En la zona de estudio se encontraron bajo la hojarasca en matorrales y en la cañada. Varios individuos se encontraron infectados por nematodos.

Familia Limacidae

Deroceras reticulatum (O. F. Müller, 1774) Fig. 4

Babosas pequeñas de 17 mm (juvenil), según otras colecciones revisadas (ICN-Mo) los adultos alcanzan una talla de 35- 40 mm. Manto situado cerca de la cabeza, en su superficie presenta un patrón de protuberancias (arrugas) concéntricas que se originan desde el lado derecho del mismo cerca al pneumostoma. Pneumostoma con un borde blanco; cola comprimida lateralmente (quillada); color crema con marcas grises; pie tripartito (3 capas), planta del pie blanquecino. Ausencia de glándula mucosa; exudado lechoso e irritante. Boca protuberante con muchas papilas alrededor.

Complejo reproductivo con una glándula de albumen muy grande del mismo tamaño de la ovotestis que es alargada con los divertículos ondulados en su superficie; el pene es muy ancho y presenta un aditamento en el ápice con 5 proyecciones.

La mandíbula es una placa completa no dividida y muy fuerte; en la región anterior a esta se encontró un tejido blando acanalado.

Rádula de tipo Istricoglosa, con un diente raquidiano (aprox. 46 micras de largo) tricúspide, con la cúspide

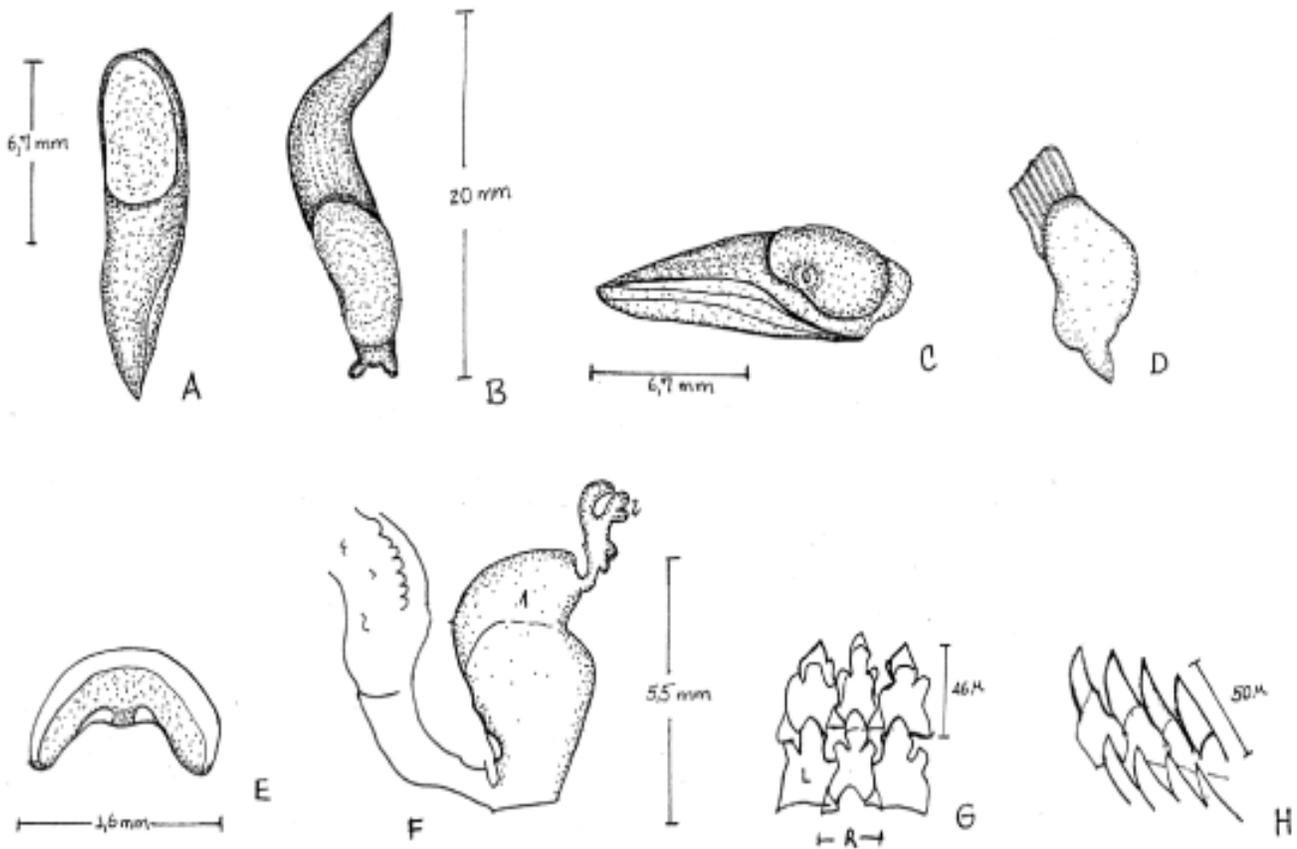


Figura 4. *Deroceras reticulatum* (O.F. Muller, 1774). **A.** y **B.**- cuerpo vista dorsal; **C.**- vista lateral; **D.**- bulbo bucal; **E.**- mandíbula; **F.**- complejo peneal (1. pene; 2. aditamento con 5 proyecciones); **G.**-diente raquidiano (R) y lateral (L);

central ovada con ápice agudo, cúspides laterales redondeadas; 16 filas de dientes laterales bicúspides (aprox. 44 micras de largo), con la cúspide interna ovada con ápice agudo y externa redondeada; y cerca de 18-20 filas de dientes marginales (aprox. 50 micras de largo) muy agudos dispuestos en relación con las filas de laterales en un ángulo de 19°. Fórmula radular: 18-20 + 16 + R + 16 + 18-20.

Medidas de dos especímenes: 16 mm largo/17 mm largo, parecen ser juveniles.

Material examinado. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, sector Mondoñedo, pantano temporal, 2580 m, número de ejemplares: 1, 14 May 2003, *M. Vera-Ardila 039* (ICN-Mo 1169) y Zanjón de las Cátedras, pantano temporal, 2580 m, número de ejemplares: 2, 26 Jun 2003, *M. Vera-Ardila 047*(ICN-Mo 1181).

Comentarios. Esta es una especie nativa de Europa; en la zona de estudio se encontró exclusivamente en los pantanos temporales. Se presenta por primera vez para el país una descripción del complejo peneal, además la rádula es de tipo Istricoglosa característica de herbívoros raspadores; se tienen datos no publicados de esta especie en Pamplona, Norte de Santander afectando cultivos de Arveja. (Colección de Durán, 2003 en ICN-Mo 1172).

Lehmania valentiana (Férussac, 1822)

Fig. 5

Babosas pequeñas, según colecciones revisadas (ICN-Mo) los adultos alcanzan una talla de 35-40 mm. Manto situado cerca de la cabeza, margen posterior del manto redondeado, superficie irregular; cola comprimida lateralmente (quillada); cuerpo color gris con punteaduras gris oscuras a negras y dos bandas longitudinales de color negro, se presenta una banda color pardo claro adicional en el manto; pie bipartito (2 capas) con el margen

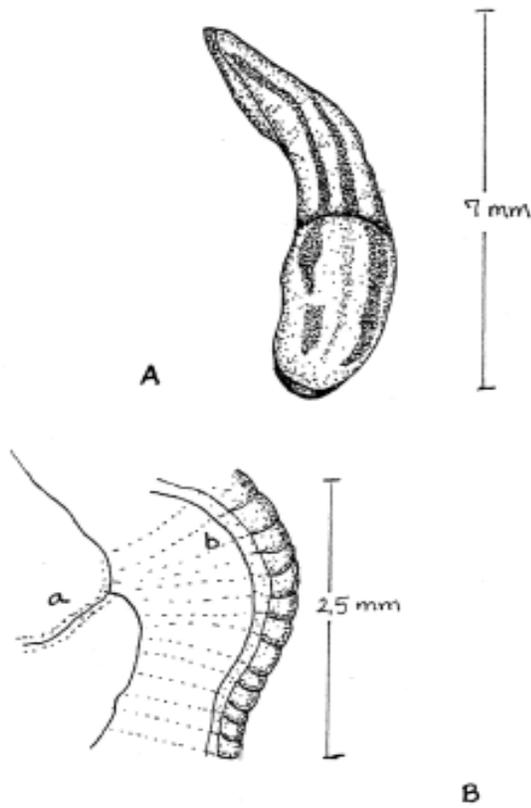


Figura 5. *Lehmania valentiana* (Férussac, 1822). A.- cuerpo vista dorsal; B.- pneumostoma (a) y fracción del pie (b).

dividido, planta del pie blanquecino; ausencia de glándula mucosa; exudado incoloro.

Medidas de dos especímenes: 6 mm largo /5 mm largo, parecen ser juveniles.

Material examinado. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, zanjón de las Cátedras, pantano temporal, 2580 m, número de ejemplares: 2. 27 Jun 2003, *M. Vera-Ardila 046* (ICN-Mo1175).

Comentarios. Esta es una especie nativa de la península Ibérica; en Colombia solo se ha encontrado en ambientes perturbados y es considerada como una plaga para la agricultura (**Hausdorf**, 2002), en la zona de estudio se encontró exclusivamente en los pantanos temporales. No se realizó la disección de los dos únicos ejemplares encontrados debido a su tamaño y cantidad, de allí que no se tenga la descripción anatómica.

Familia Orthalicidae

Drymaeus nigrofasciatus Pfeiffer in Philippi, 1846

Fig. 6

Concha ovado-cónica, delgada a sólida; color blanquecino, con un patrón de bandas transversales blancas y negras continuas, superficie suave, maleada; protoconcha cancelada; sutura bien impresa, espiras suavemente convexas; abertura sub-ovada, peristoma simple, columela amplia, callo parietal blanquecino; rimada o imperforada.

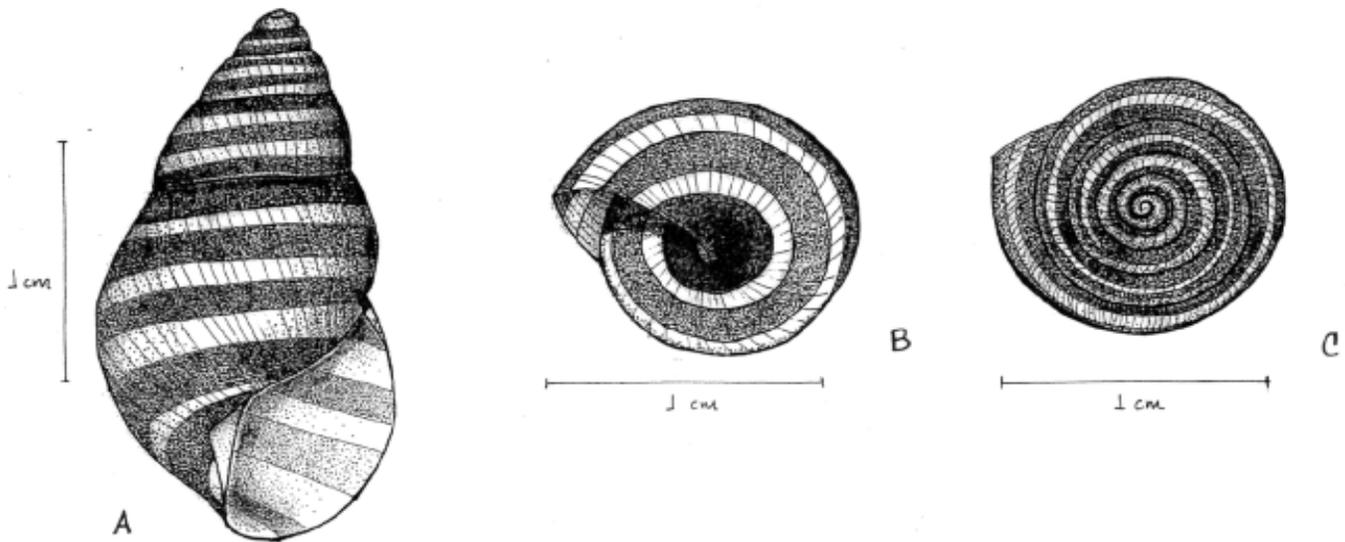


Figura 6. *Drymaeus nigrofasciatus* (Pfeiffer in Philippi, 1846). A.- concha vista abertural; B.- concha vista ventral; C.- concha vista apical.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
16	10	9.5	4.7
22,5	11	10	6

Material examinado. Se recolectaron solo conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, afloramientos rocosos al sur Laguna de La Herrera, 2580 m, número de ejemplares: 8, 1 Feb 2003, *M. Vera-Ardila 014* (ICN-Mo 1144).

Comentarios. En el país se tienen registros de la especie correspondientes a la época cerámica en los abrigos rocosos del Tequendama; se menciona un posible aprovechamiento alimenticio ya que se encontraron conchas cerca de las unidades habitacionales con otros desechos de cocina (**Correal & Van der Hammen, 1997**); en la zona de estudio se encontraron conchas exclusivamente en los afloramientos rocosos. La localidad tipo de esta especie es: Valle del Magdalena, Colombia (**Restrepo et al., 1983**).

Plekocheilus succinoides (Petit, 1840) Fig. 7

Concha ovado-alargada, delgada, color pardo con un patrón de franjas blancas en zig-zag y/o manchas irregulares blancas; superficie con microcavidades llenas de aire; protoconcha granulada y de color oscuro o rojizo; sutura bien impresa, bordeada por una banda oscura; 4 ½ vueltas; espiras débilmente convexas; abertura largo-ovada, ocupando casi la longitud total del cuerpo; peristoma blanco, medianamente expandido; columela amplia, cóncava, callo parietal transparente, imperforada.

Tentáculos oculares gris oscuros; cuerpo color pardo claro; pie lanceolado con un patrón de manchas en dos filas a lo largo de este, con un margen color rosado. Complejo peneal compuesto por un flagelo largo, la bolsa del pene es robusta y retorcida, superficie lisa; el pene es subcilíndrico, no hay diferencia externa observada entre el pene y el epifalo, posee un prepucio ensanchado; ovotestis en forma de racimo y cada divertículo bífido.

Mandíbula color pardo claro, con 16 platos contiguos laterales, dentados en el borde inferior, platos dorsales más anchos que los laterales.

Rádula con 5 filas de dientes raquidianos (aprox. 76 micras de largo) de ápice agudo; 4 filas de dientes laterales, bicúspides, obtusos (aprox. 48 micras de largo) y 80 filas de dientes marginales tricúspides (aprox. 50 micras largo). Formula radular: 80 + 4 + 5 + 4 + 80.

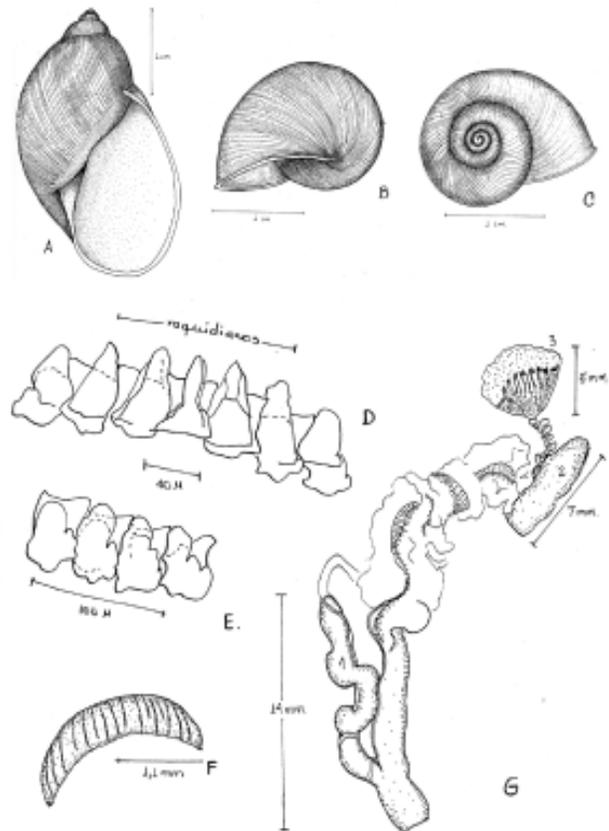


Figura 7. *Plekocheilus succinoides* (Petit, 1840). A.- concha vista abertural; B.- concha vista ventral; C.- concha vista apical; D.- diente raquidiano y laterales; E.- dientes marginales; F.- mandíbula; G.- complejo reproductivo (1. pene; 2. glándula de albúmina; 3. ovotestis).

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
32,9	19	23	14.6
36.8	22	25,5	16.4

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, Cerros de Mondoñedo, matorral cerrado, 2632 m, número de ejemplares: 55 y 3, 22 Feb y 22 Mar 2003, *M. Vera-Ardila 019* (ICN-Mo 1149) y Cuchilla de las Cátedras, matorral cerrado, 033 (ICN-Mo 1163).

Comentarios. Este es un macromolusco terrestre nativo de Sudamérica; se tienen registros correspondientes a la época cerámica en los abrigos rocosos del Tequendama y se menciona un posible aprovechamiento alimenticio ya

que se encontraron conchas de esta especie cerca de las unidades habitacionales con otros desechos de cocina (Co-real & van der Hammen, 1997), la localidad tipo de esta especie es: Santafe de Bogotá (Breure, 1977), actualmente la especie esta siendo comercializada en las plazas de mercado de Bogotá por sus propiedades terapéuticas. La rádula es de tipo Istricoglosa, característica de gastrópodos herbívoros raspadores, aunque no existen datos de los hábitos alimenticios de la especie, se presume se alimente raspando la superficie de *Opuntia schumanii*, *Agave* sp. y *Salvia* sp., en la zona de estudio.

Plekocheilus delicatus (Pilsbry, 1935)

Fig. 8

Concha ovado-alargada, delgada, delicada; color pardo con un patrón de franjas blancas en zig-zag y/o manchas irregulares blancas; protoconcha granulada y de color oscuro o rojizo; sutura bien impresa, bordeada por una banda oscura; 4 ½ vueltas; espiras débilmente convexas; abertura largo-ovada casi la longitud total del cuerpo; peristoma blanco, suave, cerradamente expandido; columela amplia, cóncava, callo parietal transparente, imperforada.

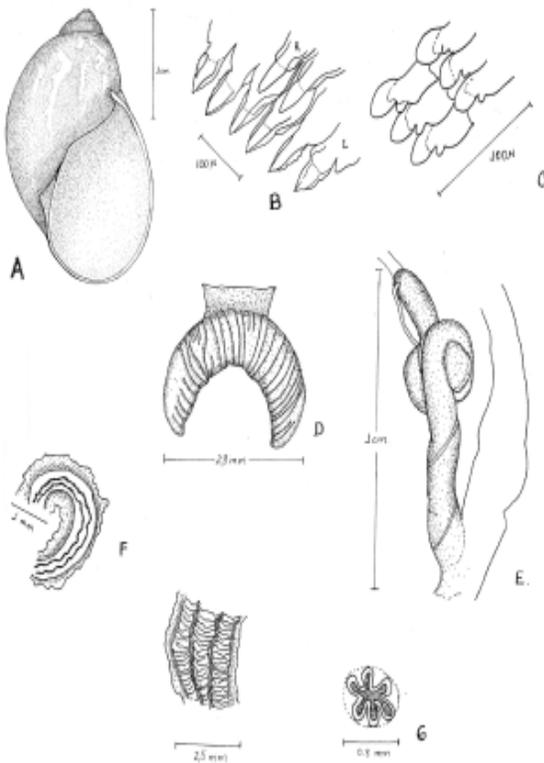


Figura 8. *Plekocheilus delicatus* (Pilsbry, 1935). A.- concha vista abertural. B.- diente raquidiano (R) y lateral (L); C.- dientes marginales; D.- mandíbula; E.- complejo peneal; F.- corte longitudinal del pene; G.- corte transversal del pene.

Pedúnculos oculares gris oscuro, cuerpo color pardo claro, pie con punteaduras pardo oscuras dispersas y escasas. Complejo peneal compuesto por un flagelo largo, el pene es retorcido en la zona cercana al flagelo, el pene esta compuesto por seis lóbulos, en su interior se disponen una serie de pliegues horizontales.

Mandíbula color amarillo anaranjada, con aproximadamente 27 platos contiguos laterales sobrepuestos.

Rádula con 7 dientes raquidianos (aprox. 60 micras de largo) de ápice agudo; 7-8 dientes laterales, bicúspides, obtusos (aprox. 30 micras de largo) y aproximadamente 80 dientes marginales bicúspides alargados (aprox. 50 micras largo). Fórmula radular: 80 + 8 + 7 + 8 + 80.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
25.4	11.7	19.9	11.7
27.4	12	19.3	12.4

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, Cerros de Mondoñedo, matorral cerrado, 2632 m, número de ejemplares: 14, 22 Feb 2003, M. Vera-Ardila 020 (ICN-Mo 1150).

Comentarios. Este es un macromolusco terrestre nativo de Sudamerica, la localidad tipo de esta especie es: Soacha (Pilsbry, 1935). La rádula es de tipo Istricoglosa, característica de gastrópodos herbívoros raspadores, no existen datos de los hábitos alimenticios de la especie, pero se presume que al igual que *P. succinoides* se alimente raspando la superficie de *Opuntia schumanii*, *Agave* sp., y *Salvia* sp.

Plekocheilus sp.

Fig. 9

Concha ovada, delgada, delicada, color rosado. Protoconcha lisa; sutura fuertemente impresa; superficie sin escultura; 3 ½ vueltas; espiras convexas; abertura subovada; peristoma blanco, semi-expandido. Columela amplia, cóncava, callo parietal transparente, imperforada.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
25.4	13.7	12	10.1
25,4	16.8	17,1	12.3

Material examinado. Se recolectaron solo conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, afloramientos rocosos, 2580 m, número de ejemplares: 24, 1 Feb 2003, *M. Vera-Ardila 013* (ICN-Mo 1143), Cerros de Mondoñedo, matorral cerrado, 2632 m, número de ejemplares: 54, 22 Feb-22 Mar 2003, *M. Vera-Ardila 021* (ICN-Mo 1151) y Cuchilla de las Cátedras, matorral cerrado, 2781 m, *031* (ICN-Mo 1161).

Comentarios. Es un macromolusco terrestre. La coloración y escultura de la concha impidieron clasificarla dentro de las otras dos especies del género encontradas en la región. Es necesario realizar nuevas colecciones para tratar de encontrar ejemplares vivos y así clarificar su estatus.

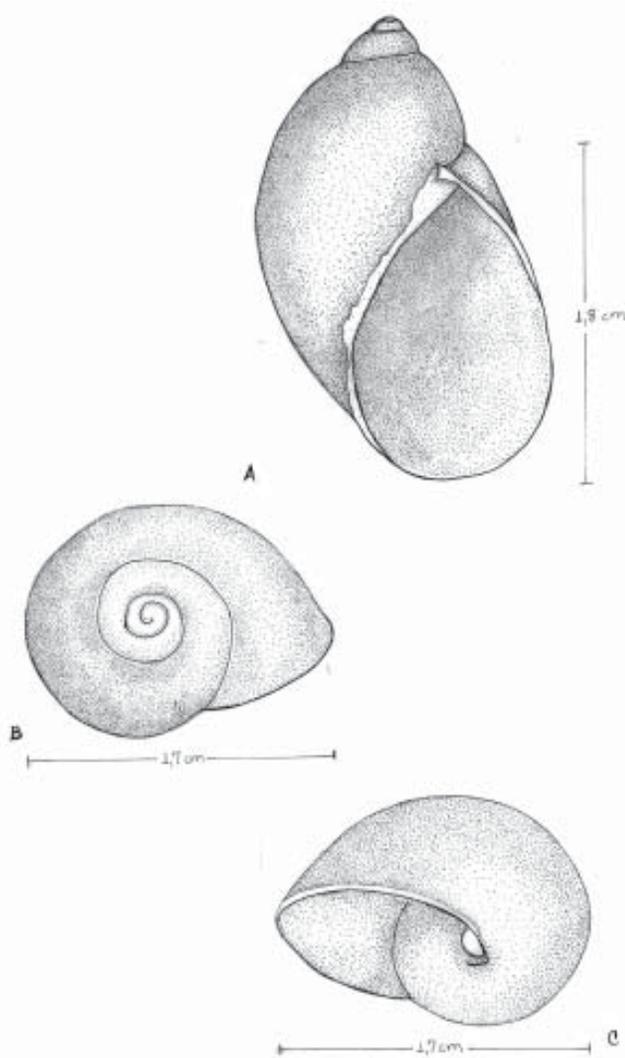


Figura 9. *Plekocheilus* sp. A.- concha vista abertural; B.- concha vista apical; C.- concha vista ventral.

Familia Physidae

Physa cubensis (Pfeiffer, 1839)

Fig. 10

Concha oblonga, delicada, color pardo brillante, abertura situada al lado izquierdo (levógira); escultura de la concha con suaves estrías, líneas de crecimiento visibles en el intermedio de los verticilos; espira cónica, baja a elevada; protoconcha lisa; ultima espira muy amplia; sutura bien impresa; verticilos convexos; abertura elongada, cerrada en la mitad superior (angulosa) y redondeada en la base; callo fuerte en la pared parietal; pliegue columelar marcado; peristoma simple; imperforada.

Tentáculos filiformes y largos, ojos en la base de los mismos; extensión labial mucronada; manto con puntea-

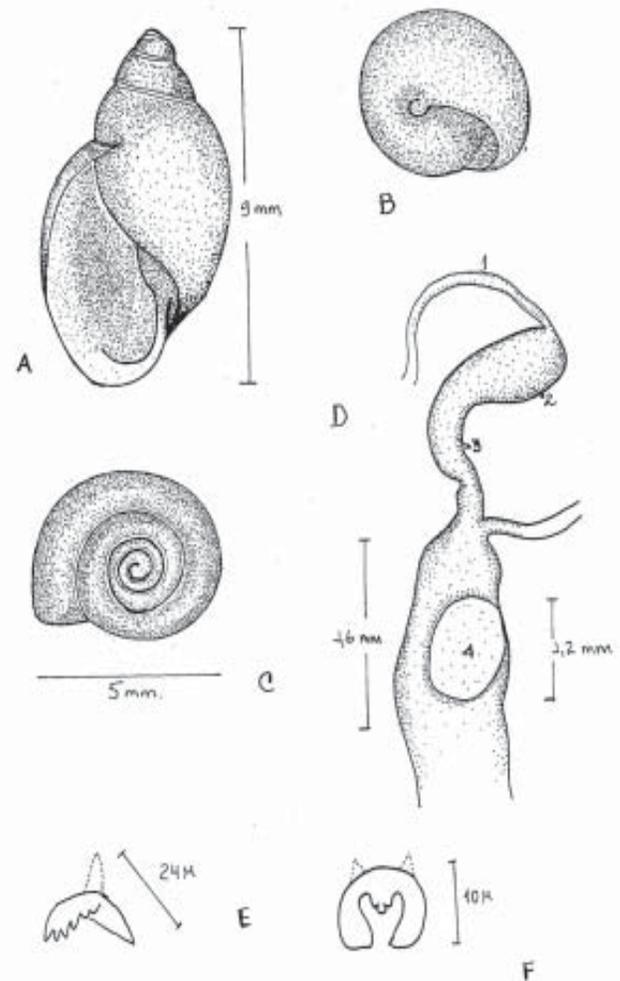


Figura 10. *Physa cubensis* (Pfeiffer, 1839). A.- concha vista abertural; B.- concha vista ventral; C.- concha vista apical; D.- complejo peneal (1. pene, 2. bolsa del pene, 3. vaso deferente, 4. glándula del prepucio); E.- diente lateral; F.- diente raquidian

duras gris oscuras; pie espatulado, “reflexión del manto con 6-8 lóbulos digitiformes en el lado columelar y de 4-6 en el lado del pneumostoma” (Paraense, 1987).

Pene coniforme libre dentro de la bolsa peneal, vaso deferente entra al pene por el lado superior que es el más grueso; bolsa peneal más ancha en la zona donde se inserta con el pene y termina como una expansión bulbosa pero estrecha donde se inserta el prepucio que es más ancho y en su lado superior tiene una glándula redondeada que ocupa la tercera parte del prepucio (glándula del prepucio).

Rádula con los dientes dispuestos en forma triangular de tipo Istricoglosa con un diente raquidiano (aprox. 10 micras de largo) en forma de herradura con unos pequeñas excrescencias en el centro; numerosos dientes laterales y marginales no diferenciados entre sí, estos presentan una forma de luna con 7 puntas en uno de sus lados (aprox. 24 micras de largo) con una aleta central. Fórmula radular: $\infty + 65 + R + 65 + \infty$.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
11	6.4	7.3	4.4
12.4	6.8	8.5	4.5

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, laguna, número de ejemplares 176, 14 May 2003, *M. Vera-Ardila 038* (ICN-Mo 1168).

Comentarios. Esta es una especie de macromolusco dulceacuícola nativo presumiblemente del norte de Sudamérica, para Colombia se ha registrado en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Valle del Cauca y Tolima (Velásquez & Escobar, 2001); esta considerada como especie invasora que ocupa rápidamente el territorio disponible, siendo un posible obstructor de cañerías (Semenas, 2000); en la zona de estudio se encontró exclusivamente en la laguna. Posee una rádula de tipo Istricoglosa típica de herbívoros raspadores; es posible vector de trematodos de la familia Echinostomatidae.

Familia Planorbidae

Biomphalaria straminea (Dunker, 1848)

Fig. 11

Concha discoidal, delgada; color pardo claro u oscuro, lustroso; superficie dorsal y ventral en forma de embudo; escultura con finas estrías longitudinales ligeramente oblicuas; protoconcha lisa y primeras espiras punteadas; sutura bien impresa; 3 1/4 vueltas; abertura subcircular; peristoma simple; ombligo profundo y ancho.

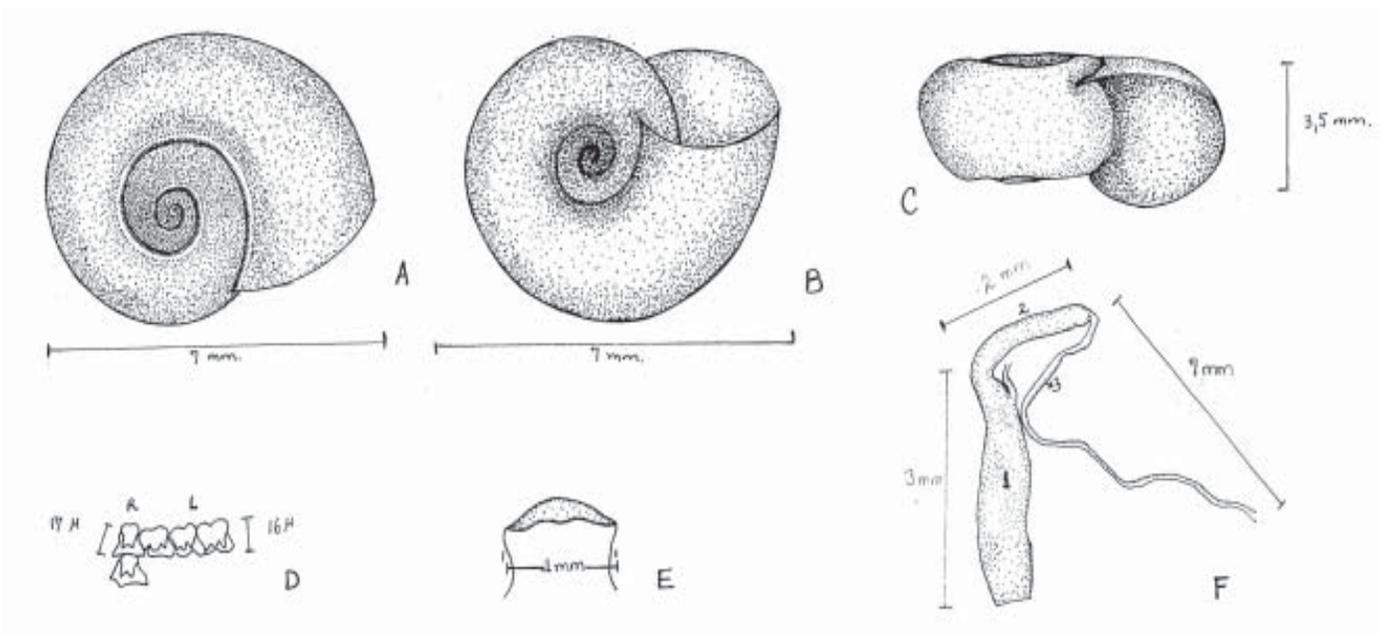


Figura 11. *Biomphalaria straminea* (Dunker, 1848). A.- concha vista dorsal; B.- concha vista ventral; C.- concha vista abertural; D.- diente raquidiano (R) y laterales (L); E.- mandíbula; F.- complejo peneal (1. prepucio; 2. pene; 3. vaso deferente).

Cuerpo de color pardo oscuro, extensión labial redondeada; ojos en la base de los tentáculos que son filiformes; manto con manchas negras. Tubo renal con punteaduras oscuras; ovotestis con numerosos divertículos no divididos y redondeados de color naranja en la parte superior; próstata con 10 divertículos divididos; bolsa del pene larga casi la longitud del pene; vaso deferente casi tres veces la longitud de la bolsa del pene; prepucio ensanchado con punteado negro, presenta dos músculos prepuciales conspicuos.

Mandíbula color pardo oscuro, un solo plato mandibular no dividido.

Rádula de tipo Istricoglosa con un diente raquidiano (aprox. 17 micras de largo) bicúspide, suavemente agudo; numerosos dientes laterales y marginales no diferenciados entre sí, tricúspides agudos (aprox. 16 micras de largo). Fórmula radular: $\infty + R + \infty$.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
0.22	0.56	0.27	0.27
0.28	0.6	0.29	0.28

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, zanjón de las Cátedras, pantano

temporal, 2580 m, número de ejemplares: 15, 17 Jun 2003, *M. Vera-Ardila 040* (ICN-Mo 1173).

Comentarios. Este es un macromolusco dulceacuícola. La localidad tipo está en Venezuela de acuerdo a **Martens** (1873) citado en **Pointier et al.**, (1993). No existen datos de los hábitos alimenticios de esta especie pero se presume sean herbívoros raspadores por el tipo de rádula que presentan. Se encontró en los pantanos temporales adherida a las raíces de *Azolla filiculoides*; el género es el principal vector de *Schistosoma mansoni* causante de la Schistosomiasis en América, en Colombia no se han reportado casos de esta enfermedad.

Familia Punctidae

Paralaoma servilis (Shuttleworth, 1852)

Fig. 12

Concha plana (depressa), delgada; color pardo claro u oscuro, lustroso; superficie con costillas lamelares transversales, oblicuas y fuertes, con escultura débilmente cancelada entre ellas; protoconcha con líneas en espiral delicadas; sutura bien impresa; 2 1/4 vueltas; abertura circular; peristoma simple; ombligo profundo y ancho.

Cuerpo de color claro-transparente con finas punteaduras grises; tentáculos cortos; superficie del manto con manchas de color negro; complejo peneal compuesto por bolsa del pene, epifalo y flagelo, el pene es cilíndrico

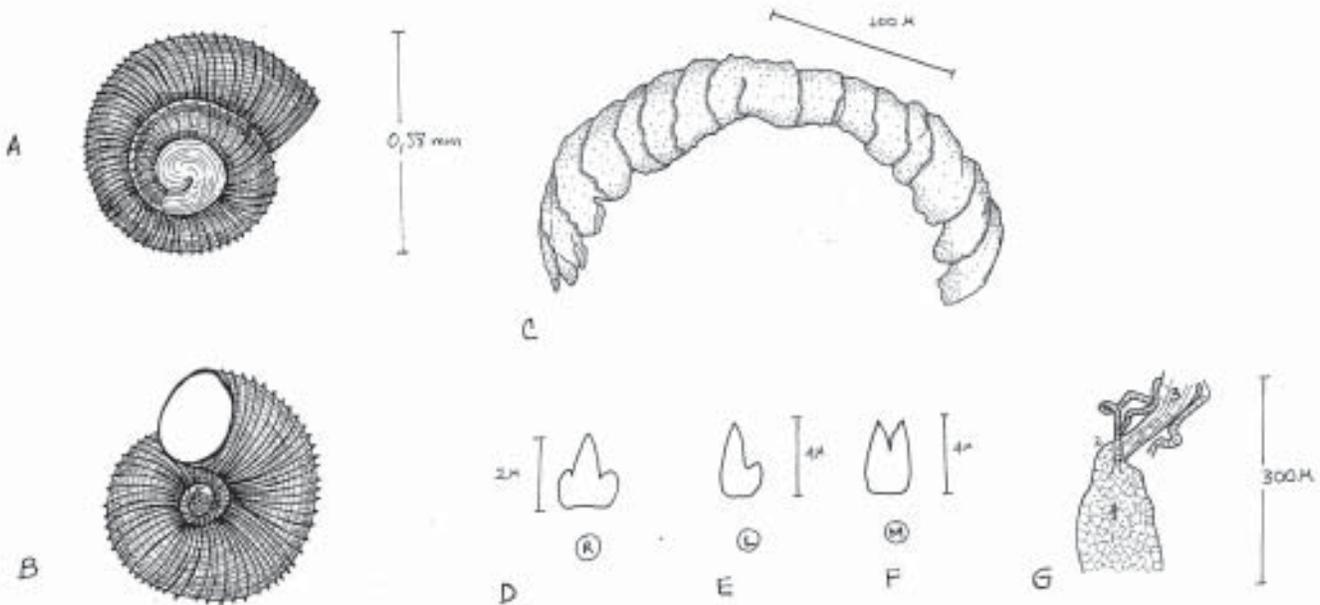


Figura 12. *Paralaoma servilis* (Shuttleworth, 1852). **A.-** concha vista dorsal; **B.-** concha vista ventral; **C.-** mandíbula; **D.-** diente raquidiano; **E.-** diente lateral; **F.-** diente marginal; **G.-** complejo peneal (1. pene, 2. epifalo, 3. flagelo).

inmerso en la bolsa, el vaso deferente se inserta en la parte superior del epifalo que es muy corto casi no diferenciado.

Mandíbula color pardo claro-amarillo, con 15 platos sobrepuestos dentados en el borde lateral e inferior, platos dorsales cuadrados y laterales alargados.

Rádula de tipo Istricoglosa con 1 diente raquidiano (aprox. 2 micras de largo) tricúspide, con la cúspide central aguda y tres veces el tamaño de las cúspides laterales, cerca de 16 dientes laterales bicúspides, cúspide externa cerca de la mitad de la interna (aprox. 4 micras de largo) y numerosos marginales bicúspides agudos (aprox. 4 micras de largo). Fórmula radular: $\infty + 16 + R + 16 + \infty$.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
0.4	0.58	0.3	0.2
1	1.8	0.8	0.8

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, cerros de Mondoñedo, afloramientos rocosos, 2580 m, número de ejemplares: 19, 1 Feb 2003, *M. Vera-Ardila 016* (ICN-Mo 1146), Cerros de Mondoñedo, matorral cerrado, 2632 m, número de ejemplares: 31, 22 Feb 2003, *M. Vera-Ardila 022* (ICN-Mo 1152), Cuchilla de las Catedras, matorral abierto, 2670 m, número de ejemplares: 4, 15 Mar 2003, *M. Vera-Ardila 028* (ICN-Mo 1158), Cuchilla de las Catedras, matorral cerrado, 2781 m, número de ejemplares: 9, 22 Mar 2003, *M. Vera-Ardila 030* (ICN-Mo 1160), Cuchilla de las Catedras, bosque exótico, 2691 m, número de ejemplares: 32, 1 May 2003, *M. Vera-Ardila 036* (ICN-Mo 1166), Cerros de Mondoñedo, cañada, 2700 m, número de ejemplares: 144, 27 Jun 2003, *M. Vera-Ardila 041* (ICN-Mo 1177), Cerros de Mondoñedo, prado nativo, 2700 m, número de ejemplares: 6, 27 Jun 2003, *M. Vera-Ardila 044* (ICN-Mo 1178).

Comentarios. Este es un micromolusco terrestre, probablemente nativo de Australia, aunque ha sido reconocida bajo varios nombres en todos los continentes donde se ha encontrado. Se presume que llegó a Sudamérica por dos vías: Europa o directamente de allí con los eucaliptos traídos al país (Hausdorf, 2002); en Colombia se tienen registros en el departamento de Cundinamarca (Mosquera, La Calera y Bogotá) (Hausdorf, 2002). No se tienen datos de sus hábitos alimenticios, pero por el tipo de rádula se presume sean herbívoros raspadores que se alimentan de algas del suelo, hojas, líquenes y musgos.

Familia Succineidae

Succinea kuntziana Solem

Fig. 13

Concha ovado - globosa, delgada, dextrógira; color ámbar; escultura de finas estrías longitudinales; protoconcha rojiza y lisa; sutura bien impresa, espiras convexas, última espira amplia; 2 ½ vueltas, abertura amplia arriñonada; peristoma simple, columela semi-cóncava; callo parietal transparente, pliegue columelar casi cierra el ombligo; rimada.

Cuerpo color pardo muy claro con punteaduras finas pardo oscuras; tentáculos cortos, con la base ensanchada, ojos en el ápice de estos. Riñón visible de color amarillo. Ovotestis con numerosos divertículos manchados de negro; espermateca esférica de 0.25 mm, color rosado; receptáculo seminal con punteado muy denso de color negro; glándula de albumen de la misma longitud que la espermateca y de color blanquecino con un leve punteado negro en su superficie; complejo penial de 1.05 mm de largo, epifalo muy corto, el vaso deferente se inserta a 0.25 mm lateralmente a la inserción del músculo retractor del pene. Pene de 0.7 mm de longitud.

Mandíbula de color pardo oscuro con un plato basal accesorio cuadrangular.

Rádula de tipo Istricoglosa con 1 diente raquidiano (aprox. 20 micras de ancho) tricúspide con la cúspide central aguda y tres veces el tamaño de las cúspides laterales, 10 dientes laterales (aprox. 20 micras de largo) bicúspides, cúspide externa es la tercera parte de la interna; 14 dientes marginales (aprox. 16 micras de largo) tricúspides, cúspides externas muy pequeñas y agudas. Fórmula radular: $14 + 10 + R + 10 + 14$.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
7.3	5.9	5,3	3.9
8.5	6	6,5	4.5

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, Cuchilla de las Catedras, matorral abierto, 2670 m, número de ejemplares: 1, 15 Mar 2003, *M. Vera-Ardila 027* (ICN-Mo 1157), región subxerofítica de la Herrera, zanjón de las Catedras, pantano temporal, 2580 m, número de ejemplares: 1, 27 Jun 2003, *M. Vera-Ardila 048* (ICN-Mo 1179).

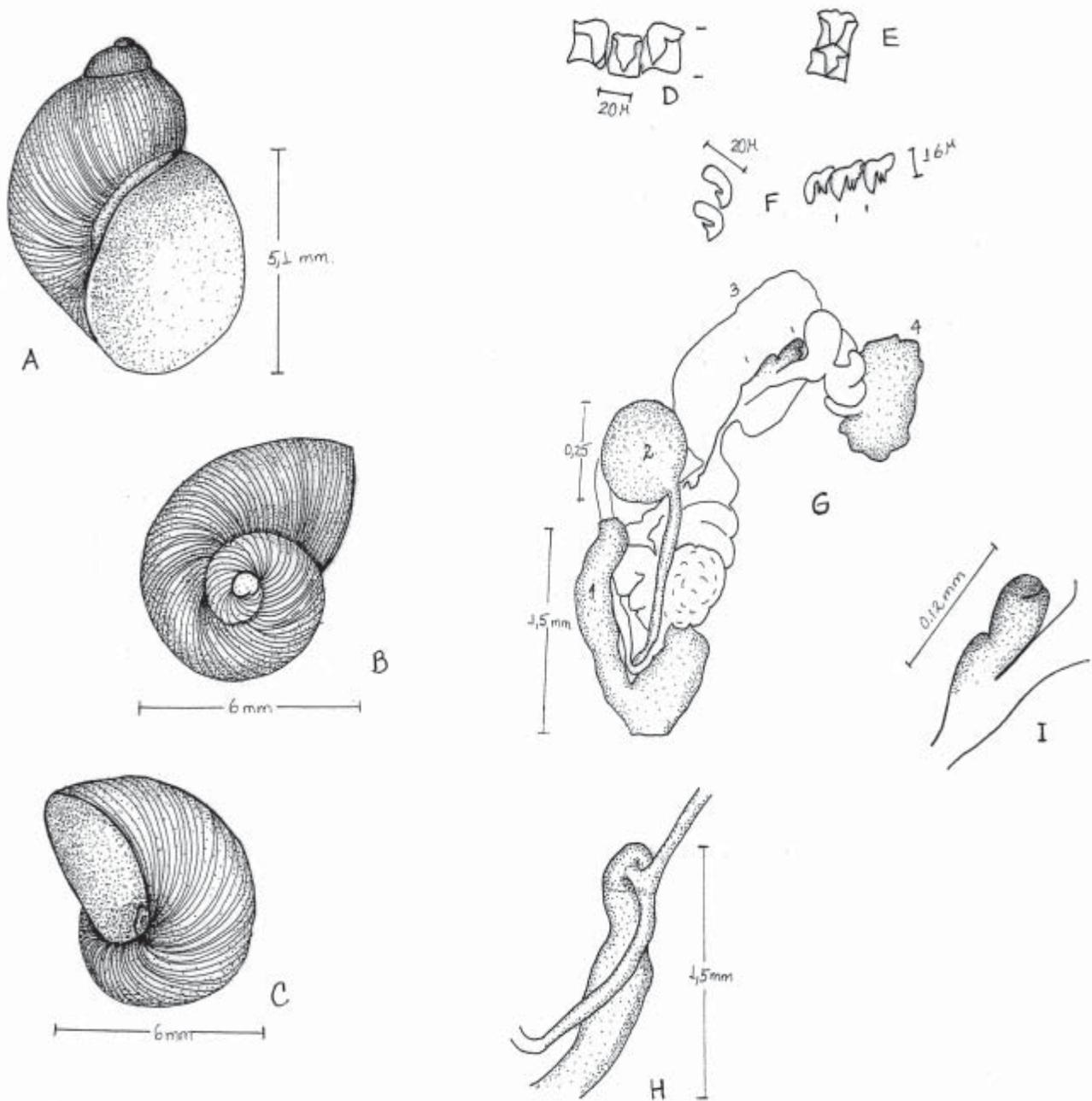


Figura 13. *Succinea kuntziana* Solem. **A.**- concha vista abertural; **B.**- concha vista dorsal; **C.**- concha vista ventral. **D.**- diente raquidiano y laterales; **E.**- diente raquidiano; **F.**- dientes marginales; **G.**- complejo reproductivo (1. pene, 2. espermateca, 3. glándula de albúmina, 4. ovotestis, 5. receptáculo seminal); **H.**- complejo peneal (1. pene, 2. vaso deferente, 3. epifalo); **I.**- receptáculo seminal.

Comentarios. Es un macromolusco anfibio, los primeros registros del género para Colombia los hace **Jaekel** (1965); en la zona de estudio se encontró en el pantano temporal y en matorrales abiertos en un rango altitudinal de 100 m. Por el tipo de rádula se presume sean herbívoros raspadores.

La rádula (Istricoglosa) es característica de especies de herbívoros raspadores, con un diente raquidiano y numerosos laterales y marginales. No existen datos sobre los hábitos alimenticios de esta especie, se presume que se alimenten raspando la superficie de musgos y de rocas cubiertas por líquenes.

Succinea sp.

Fig. 14

Concha ovado-alargada, delgada, color pardo claro; protoconcha lisa; sutura bien impresa; espiras convexas, primeras espiras elevadas, última espira amplia; 3 vueltas; abertura ovado-alargada, peristoma simple, columela cóncava, rimada, callo parietal transparente.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
9.4	6	6.5	4.6
9.8	6.4	7.4	4.7

Material examinado. Se recolectaron solo conchas. Cundinamarca. Mosquera. región subxerofítica de La

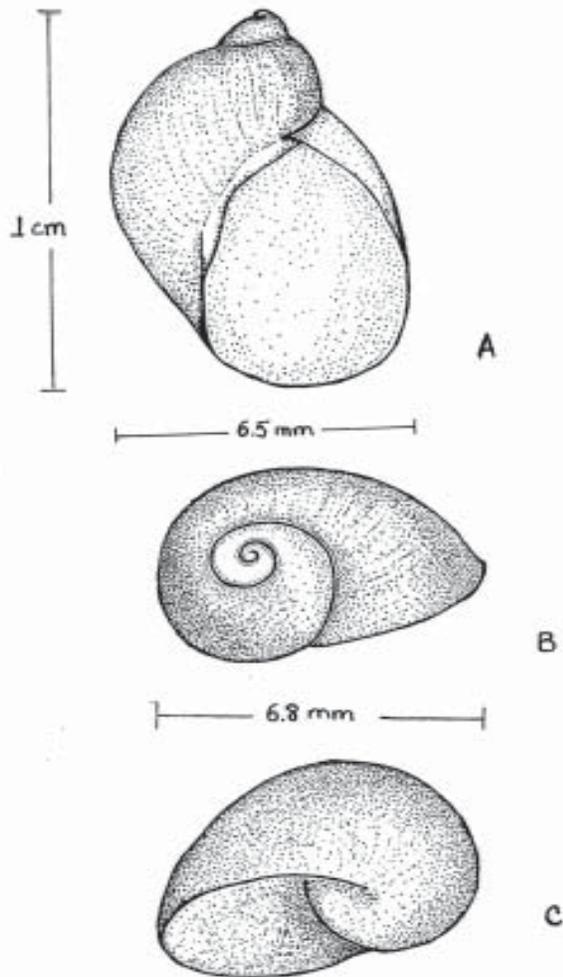


Figura 14. *Succinea* sp. A.- concha vista abertural; B.- concha vista dorsal; C.- concha vista ventral.

Herrera, Cuchilla de las Cátedras, matorral cerrado, 2781 m, número de ejemplares: 24, 22 Mar 2003, M. Vera-Ardila 035 (ICN-Mo 1165).

Comentarios. Los ejemplares de *Succinea* sp. difieren de los ejemplares de *Succinea kuntziana* Solem en características como: elevación de las primeras espiras, consistencia de la concha un poco más sólida; y forma menos globosa (en *Succinea* sp.). En la zona de estudio no se encontraron ejemplares vivos; las conchas estaban tanto en ambientes terrestres (matorral) como en ambientes inundables (pantano).

Familia Vertiginidae

Gastrocopta rupicola (Say, 1821)

Fig. 15

Concha diminuta, cilíndrica, dextrógira, fuerte, color blanquecino opaco con estrías oblicuas, protoconcha lisa, espiras profundamente convexas; sutura bien impresa; 4 $\frac{3}{4}$ -5 vueltas; abertura circular. Labio interno fuerte con un callo fuerte blanco, con 5 lamelas, una columelar, una parietal, una angular, una bajo palatal y una suprapalatal, la lamela parietal y angular convergen hacia el interior y se unen. Ángulo de 45° del pliegue palatal con la columela.

Cuerpo oscuro, tentáculos cortos.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
1.2	0.5	No	No
2	1	1	0.8

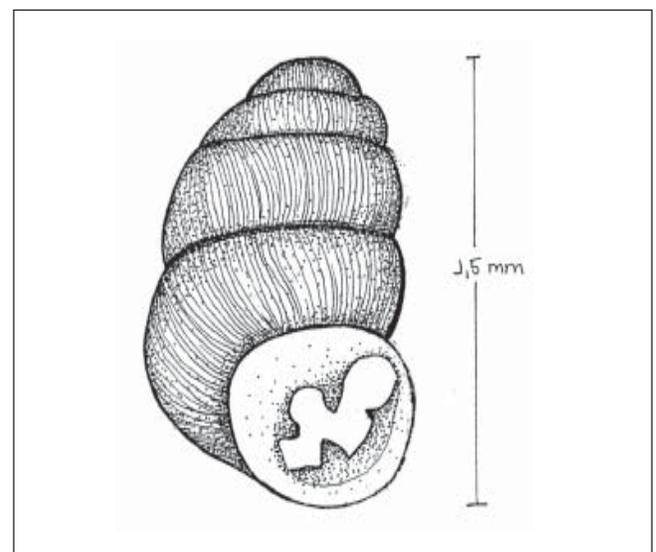


Figura 15. *Gastrocopta rupicola* (Say, 1821)

Material examinado. Se recolectó un ejemplar vivo además de conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, afloramientos rocosos, 2580 m., número de ejemplares: 1, 1 Feb 2003, *M. Vera-Ardila 015* (ICN-Mo 1145), Cerros de Mondoñedo, matorral cerrado, 2632 m, número de ejemplares: 5, 22 Feb y 22 Mar 2003, *M. Vera-Ardila 023* (ICN-Mo 1153) y Cuchilla de las Cátedras, matorral cerrado, 2781 m, 032 (ICN-Mo 1162).

Comentarios. Es un micromolusco terrestre, se presume que es nativo de Norte América (Burch, 1962), el primer registro para Colombia del género lo hace Jaeckel (1965) para zonas boscosas andinas; en la zona de estudio se encontró en los matorrales y en los afloramientos rocosos. No se realizó la disección del único ejemplar vivo encontrado debido a su tamaño, de allí que no se tenga la descripción de su anatomía, se espera realizar otra colección para así poder anexar estos datos.

Pupisoma dioscoricola (C. B. Adams, 1845) Fig. 16

Concha globosa, ovado-cónica, delgada, dextrógira; color pardo claro, lustrosa, con estrías longitudinales. Protoconcha suave, espiras bien redondeadas profundamente convexas, 3 ½ vueltas; sutura bien impresa; abertura subcircular, peristoma simple, columela cóncava, callo parietal amplio blanquecino; rimada.

Cuerpo color grisáceo. Tentáculos muy cortos y anchos, ojos en el ápice de estos.

Mandíbula color pardo amarillento, con aproximadamente 10 platos mandibulares, con unas finas estrías en su superficie.

Rádula de tipo Istricoglosa con 1 diente raquidiano (aprox. 5 micras de largo) tricúspide con la cúspide central redondeada y dos veces el tamaño de las cúspides laterales; cerca de 6 dientes laterales bicúspides, cúspide externa redondeada con dos dientecillos internos agudos, (aprox. 5 micras de largo) y aproximadamente 5-6 marginales serrados (aprox. 3 micras de largo). Fórmula radular: 5/6 + 6 + R + 6 + 5/6.

Medidas (mm):

Concha		Abertura	
Alto	Diámetro	Largo	Ancho
1.9	1.6	0.5	0.5
2	1.5	1	1

Material examinado. Se recolectaron ejemplares vivos y conchas. Cundinamarca, Mosquera, región subxerofítica de La Herrera, afloramientos rocosos, número de ejemplares: 2, 22 Feb 2003, *M. Vera-Ardila 017* (ICN-Mo 1147), Cerros de Mondoñedo, matorral cerrado, 2632 m y 2670 m, número de ejemplares: 1 y 4, 15 Mar y 22 Mar 2003, *M. Vera-Ardila 025* (ICN-Mo 1155) y Cuchilla de las Cátedras, matorral cerrado, 2781 m, 034 (ICN-Mo 1164), Cerros de Mondoñedo, cañada, 2700 m., número de ejemplares: *M. Vera-Ardila 043* (ICN-Mo 1180).

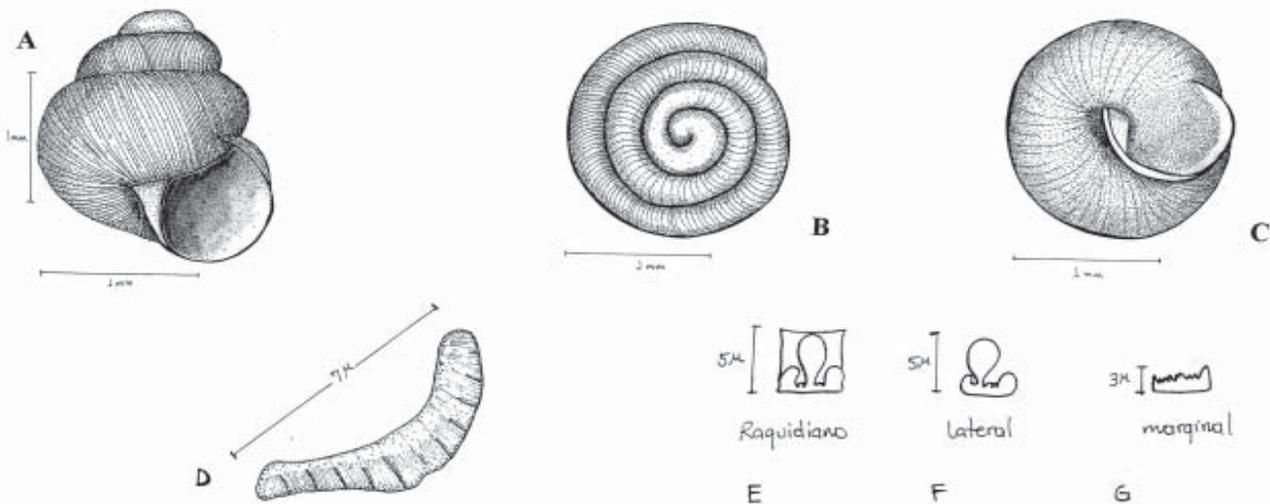


Figura 16. *Pupisoma dioscoricola* (Adams, 1845). concha vista abertural; B.- concha vista dorsal; C.- concha vista ventral; D.- mandíbula; E.- diente raquidiano; F.- diente lateral; G.- diente marginal.

Comentarios. Es un micromolusco terrestre; no existen datos sobre la alimentación de esta especie pero por el tipo de rádula se presume sean herbívoros raspadores; en este trabajo se presenta por primera vez para el país la descripción del complejo bucal (mandíbula y rádula). En uno de los dos únicos ejemplares vivos recolectados de esta especie en la región subxerofítica de la Herrera se encontró una micro-concha alojada en el manto del animal; se presume la viviparidad en esta especie.

Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia y a la doctora Luz Elena Velásquez del PECET de la Universidad de Antioquia por su asesoría para la realización de las disecciones y determinación de moluscos dulceacuícolas.

Literatura citada

- Barbosa, F. S.; Berry, E. G.; Harry, H. W.; Hubendick, B.; Malek, E. A. & Paraense, W. L.** 1968. A Guide for the Identification of the Snail Intermediate Hosts of Schistosomiasis in the Americas. Scientific Publication No. 168. Pan American Health Organization. Pan American Sanitary Bureau, Regional Office of the World Health Organization 525 Twenty-Third Street, N. W. Washington, D. C. 20037, U.S.A.
- Bogon, K.** 1990. Landschnecken, Biologie, Ökologie, Biotopschutz. Natur Verlag, Augsburg.
- Breure, A.S.H.** 1977. Notes on Bulimulidae (Gastropoda: Euthyneura). On some collections from Colombia. Arch. Moll. **107** (4/6): 257-270.
- _____, 1979. Systematics, phylogeny and zoogeography of Bulimulinae (Mollusca). Zool. Verhandelingen **168**: 1-215.
- Burch, J.B.** 1962. How to Know the Eastern Land Snails. The Pictured-Key Natural Series. pp. 215.
- _____, & **Younghun Jung**, 1988. Land snails of the University of Michigan Biological Station Area. pp. 177.
- Castellanos, J.** 2000. Plan de Ordenamiento Territorial. Municipio de Mosquera, Planeación Municipal.
- Coney, C.C., A.T. Wallace & R. Bohannan.** 1981. A method of collecting minute land snails. The Nautilus **95** (1): 43-44.
- Correal U, G. & T. Van der Hammen.** 1997. Investigaciones Arqueológicas en los Abrigos Rocosos del Tequendama. El Cuaternario de Colombia, Volumen Especial I. Bogotá.
- Fonseca A. M., Thomé J. W.** 1993. Descrição de *Glabrogyra* subgen. N., recharacterização de *Austrodiscus twomeyi* (Parodiz, 1954) e reclassificação das espécies sulamericanas dos gêneros *Austrodiscus* Parodiz, 1957, *Radioconus* Baker, 1927, *Radiodomus* Baker, 1930 e *Trochogyra* Weyrauch, 1965. Iheringia, Sér. Zool.(75): 97-105.
- _____, 1994. Conquiliomorfologia e anatomia dos sistemas excretor e reprodutor de *Radiodiscus thomei* Weyrauch, 1965 (Gastropoda, Stylommatophora, Charopidae). Biociencias **2** (1): 163-188.
- Gómez, M.I. & L.E. Velásquez.** 1999. Estudio de los moluscos de agua dulce de la Reserva Ecológica "Cerro de San Miguel" (Caldas, Antioquia) Actualidades Biológicas **21** (71): 151-161.
- Hausdorf, B.** 2002. Introduced Land snails and slugs in Colombia. J. Moll. Stud. **68**: 127-131.
- Jaeckel, S.G.A.** 1965. Die Mollusken Sudamerikas. Dr. Junk N. V. Publishers The Hague. pp. 794-827.
- Malek, E. A., & F.B. Cogswell.** 1980. Lymnaea (Pseudosuccinea) columela in Colombia. The Nautilus **94** (3): 112-114.
- Martens, E., 1873.** Die Binnenmollusken Venezuela's. Festschr. Feir Hundert. Best. Gesell. Naturforsch. Freunde Berlin: 157-225.
- Paraense, L.W.** 1987. *Physa cubensis* Pfeiffer, 1839 (Pulmonata: Physidae). Mem. Inst. Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro **82** (1): 15-20.
- Pereira de Souza, C.** 1997. Moluscos de Interesse parasitológico do Brasil. Belo Horizonte Série de esquistossomose No. 1.: 79.
- Pilsbry, H.A.** 1921. A *Radiodiscus* from Bogotá, Colombia. The Nautilus **35** (2): 49.
- _____, 1935. South American land and freshwater mollusks, IX- Colombian species. Proc. Acad. Nat. Sci. Phil. **87**: 83-88.
- Pinzón, M.** 2000. Distribución y diversidad de briofitos y líquenes de la región subxerofítica de La Herrera, Mosquera-Cundinamarca. Trabajo de Grado. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Pointier, J.P., L.W. Paraense & V. Mazille.** 1993. Introduction and Spreading of *Biomphalaria straminea* (Dunker, 1848) (Mollusca: Pulmonata: Planorbidae) in Guadeloupe, French West Indies. Mem. Inst. Oswaldo Cruz, **88** (3): 449-455.
- Rangel, L.J. & J. Gamboa.** 2001. Diversidad malacológica en la región Maya. I. Parque estatal de La Sierra, Tabasco, México. Acta Zoológica Mexicana **82**:1-12.
- Restrepo, C., M. Giraldo, F. Borrero.** 1983. Moluscos terrestres colectados en el Bosque seco tropical del Valle del Cauca y Cauca. Cespedesia **45-46**: 111-124.
- Semenas, L.** 2000. Biogeografía de Mollusca Argentina. Universidad Nacional Del Comahue. Centro Regional Universitario Bariloche. Carrera: Profesorado y Licenciatura en Biología. Materia: Invertebrados "A", año 2000.
- Soler, E.** 1983. Contribución al estudio taxonómico y ecológico de caracoles (pulmonados) de agua dulce de la Sabana de Bogotá. Trabajo de Grado. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Vaught, K. C., R. T. Abbott & J. B. Kenneth.** 1989. A Classification of Living Mollusca. American Malacologist Inc., Melbourne, Florida.: 1-145.
- Velásquez, L.E. & J.S. Escobar.** 2001. *Physa cubensis* Pfeiffer; 1839 (Pulmonata: Physidae) en la Sabana de Bogotá (Cundinamarca, Colombia). Actualidades Biológicas **23** (75): 75-80.
- Vera-Ardila, M.L.** 2003. Gastrópodos de la región subxerofítica de La Herrera (Mosquera, Cundinamarca). Trabajo de Grado. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Recibido el 1° de diciembre de 2004

Aceptado para su publicación el 22 de junio de 2005

FE DE ERRATAS

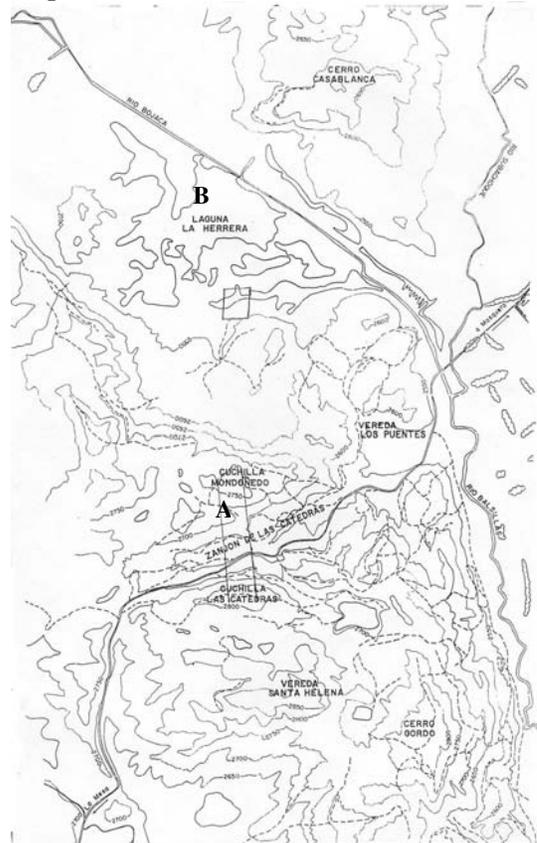
Autores: Mónica Lucia Vera-Ardila & Edgar L. Linares

Título: GASTEROPODOS DE LA REGION SUBXEROFITICA DE LA HERRERA, MOSQUERA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA.

Revista: Rev. Acad. Colomb. Cienc. Vol. XXIX, No. 112 Septiembre 2005

Página
440

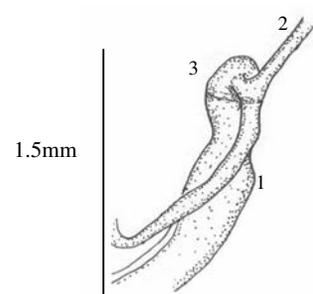
A corregir en el artículo
En la figura 1, faltan las letras A y B en el
mapa



449

En la leyenda de la figura 10 léase:D.
complejo peneal (1. vaso deferente, 2. bolsa
del pene, 3. pene, 4. glándula del prepucio);
...

En la figura 13 en la parte H faltan los números en el dibujo.



En todas las figuras (excepto el mapa)

Elaborado por MLVA (Mónica L. Vera-Ardila)