

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXI

SEPTIEMBRE DE 2007

NÚMERO 120

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Antropología (Anthropology)		Química (Chemistry)	
La diversidad poblacional de Colombia en el tiempo y el espacio: Estudio Craneométrico [Cranial variation of the Colombian prehispanic populations] <i>José V. Rodríguez C.</i>	321	Uso de métodos químicos en la obtención de SnO ₂ empleado como sensor de gases [Obtention of SnO ₂ gas sensor through chemical methods] <i>A. Montenegro, M. Ponce, M. S. Castro & J. E. Rodríguez-Páez</i> ..	405
Biología (Biology)		Zoología (Zoology)	
<i>Acumulación de Pb, Cd y Zn en sedimentos asociados a Rhizophora Mangle, en el Río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia</i> [Accumulation of Pb, Cd, and Zn in sediments associated to Rhizophora Mangle in Sevilla River, Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia] <i>Juan Pablo Parra & Luisa Fernanda Espinosa</i>	347	First record of <i>Eufriesea Bare</i> González & Gaiani and notes on the distribution of three species of orchid bees pertaining to the genus <i>Euglossa</i> Latreille (Apidae: Euglossini) in Colombia [Primer registro de <i>Eufriesea Bare</i> González & Gaiani y notas sobre la distribución de tres especies de abejas de las orquídeas pertenecientes al género <i>Euglossa</i> Latreille (Apidae: Euglossini) en Colombia]. <i>Alejandro Parra-H & Guiomar Nates-Parra</i>	415
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		Nuevos registros de crustáceos, decápodos de agua dulce, (Trichodactylidae, Pseudothelphusidae, Atyidae, Palaemonidae), en la Región de Acandí [New Registers of fresh water Crustacean, Decapod (Trichodactylidae, Pseudothelphusidae, Atyidae, Palaemonidae) in Acandí Region] <i>Diana R. Triana & Martha R. Campos</i>	
Deformaciones volumétricas con y sin colapso de algunos suelos no saturados [Volumetric deformations with and without collapse of some unsaturated soils] <i>Miguel Ángel Alfaro Soto</i>	355	Notas (Notes)	
Modelación Numérica de Eventos Tsunamigénicos en la Cuenca Pacífica Colombiana – Bahía de Buenaventura [Numerical Modeling of Tsunamigenic Events in the Colombian Pacific Basin – Buenaventura Bay] <i>Juan C. Restrepo & Luis J. Otero</i>	363	Primer registro del género <i>Microtityus</i> Kjellesvig-Waering, 1966 (Scorpiones: Buthidae) en Colombia [First record of the genus <i>Microtityus</i> Kjellesvig-Waering, 1966 (Scorpiones: Buthidae) in Colombia] <i>Ricardo Botero-Trujillo & Jorge Ari Noriega A.</i>	
Contribución al análisis macrosísmico del terremoto del 7 de Junio de 1925: principales efectos en la ciudad de Cali [Contribution to macroseismic analysis of the June 7 th 1925 earthquake: major effects in Cali city] <i>Elkin de Jesús Salcedo Hurtado, Mario Diego Romero Vergara & María Alexandra Vallejo Chocué</i>	379	Constitución de la Academia (Members of the Academy).....	
Psicología (Psychology)		Publicaciones de la Academia (Publications of the Academy).....	
Psicología en el contexto de las Ciencias Naturales, comportamiento y evolución [Psychology in the context of Natural Sciences, behavior and evolution] <i>Rubén Ardila</i>	395	437	
		439	

LA DIVERSIDAD POBLACIONAL DE COLOMBIA EN EL TIEMPO Y EL ESPACIO: ESTUDIO CRANEOMÉTRICO

Por

José V. Rodríguez C., Ph.D.¹

Resumen

Rodríguez C., J. V.: La diversidad poblacional de Colombia en el tiempo y el espacio: Estudio craneométrico cranial variation of the colombian prehispanic populations Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 321-346, 2007. ISSN 0370-3908.

Se estudian mediante análisis multivariado 17 muestras craneológicas de Colombia, que abarcan distintos períodos (Precerámico, Formativo, Tardío, Contemporáneo) y regiones (Andes Orientales, Valles del Magdalena y Cauca, Caribe, Nariño). Se evalúa el dimorfismo sexual mediante pruebas estadísticas (Kolmogorov-Smirnov), el grado de diferenciación de los grupos colombianos (prueba Kruskal-Wallis) y sus agrupaciones según similitud craneométrica (análisis discriminante, componentes principales y conglomerados jerárquicos). Igualmente se comparan con muestras de América, Siberia, Australia, Melanesia, Polinesia y Japón. Se propone un proceso microevolutivo entre los cazadores recolectores y plantadores tempranos con las poblaciones agroalfareras, un tronco ancestral común entre las poblaciones andinas y del valle del río Cauca. Con relación a la problemática del poblamiento de América se señala que los primeros pobladores provenían del noreste de Asia, con rasgos mesomorfos, cuyos relictos podrían conservarse en los paleoamericanos colombianos (Tequendama, Aguazuque) y en poblaciones contemporáneas de Brasil (Botocudo) y California (Pericú). No se confirma la pregonada relación con los australo-melanesios, ni la interrupción evolutiva entre paleoamericanos e indígenas contemporáneos, ni las oleadas migratorias tardías hacia los Andes Orientales.

Palabras clave: diversidad poblacional antigua, craneometría, análisis multivariado, orígenes de indígenas americanos.

¹ Profesor Titular Dpto. de Antropología, Universidad Nacional de Colombia, Miembro Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN).

Abstract

The peopling of the Colombian territory has been the focus of anthropological attention since the last half century. Proponents of multiple migration models have claimed that the cultural change from Preceramic to Formative and Late Periods reflect discrete migrations from lowlands to highlands. The micro-evolution model proposes that the craniometry variation reflects a population structuring processes such as long time adaptation, genetic drift, demographic growth, and other phenomena. I examined a 17 series using 21 cranial, 33 facial and 11 mandibular measurements of Preceramic (IX-II millennia BC, n= 60), Formative (I millennia BC to VI century AD, n= 59) and Late (VII-XVI centuries AD, n= 430) crania from East Andean, Cauca Valley, Magdalena Valley, Nariño and Caribe. Analyses included univariate and multivariate analysis of variance, principal component analysis, discriminant analysis and calculation of biological distances. The data are consistent with Formative populations having derived from Preceramic populations (micro-evolution model).

Key words: Colombian prehispanic populations; craniometry; ancient population structure; multivariate analysis.

1. Introducción

La precisión y estandarización de las medidas craneométricas, la naturaleza conservativa de la variación continua que refleja, la posibilidad de conectar el pasado y presente de las poblaciones humanas, el carácter hereditario de sus componentes y la posibilidad de los análisis multivariados, hacen de la craneometría una de las ramas predilectas de la bioantropología (Pietrusewsky, 2000: 375). Los estudios sobre distancias biológicas apoyados en la variación craneométrica y morfológica de poblaciones antiguas, se han encaminado a explorar cuestiones básicas de la historia evolutiva, a direccionar problemas arqueológicos como la naturaleza del patrón de residencia y como contexto de los estudios de paleodemografía y paleopatología, pues estos aspectos varían de población en población (Buikstra *et al.*, 1990: 6). Las investigaciones sobre poblaciones suramericanas (Rothhammer, Silva, 1990), norteamericanas (Sciulli, 1990), europeas (Sokal *et al.*, 1987; Lalueza *et al.*, 1996) y contemporáneas (Relethford, 1994; Hanihara, 1996) señalan que la diversidad craneométrica se encuentra en concordancia con la genética, donde la respuesta a factores climáticos sería una explicación de la diferenciación morfológica, que la proximidad geográfica es uno de los principales factores de afinidad fenotípica, que África no es necesariamente el centro geográfico y genético de la radiación de los humanos modernos (Hanihara, 1996: 409), y que el aislamiento de algunos grupos como el Vasco de España es una de las principales fuentes de diversidad poblacional (Lalueza *et al.*, 1996: 426).

En Colombia los primeros estudios craneológicos (finales del siglo XIX a mediados del XX) se centraron en la discusión sobre los orígenes de dolicocefalos y braquicefalos

(índice cefálico horizontal) y en la práctica de la deformación craneal, que al parecer de Paul Broca (1875) correspondía a distintos grupos étnicos. Por la forma alargada y alta (dolico-hipsicefalia) de algunos cráneos de Tunebia (llanos Orientales) R. Verneau (1924) y posteriormente H. Rochereau (1938) propusieron la presencia de un elemento Papua en los llanos Orientales de Colombia, y, por consiguiente, un proceso migratorio desde Australia-Melanesia desde el sur por un supuesto puente de islas que las conectaba con la Patagonia. José Pérez de Barradas (1951, 1955) señalaba por su parte, que la práctica de la deformación craneal podía corresponder a costumbres introducidas por grupos Karib, o a la persistencia de elementos premuisca. En los años 40 Eliécer Silva Celis (1945, 1946, 1947) contribuyó de manera importante al conocimiento de la bioantropología de Boyacá y Santander (área de influencia de los grupos étnicos tardíos Muisca, Lache, Chitarero), señalando la presencia de dolicocefalos, mesocéfalos y braquicefalos en distintas proporciones, evidenciando la gran variabilidad de estas poblaciones. Justus W. Schottelius (1946) analizó los primeros restos momificados de las cuevas de Los Santos, Santander (área de influencia Guane) describiendo una práctica desconocida de deformación craneal pseudocircular.

Hacia finales de los años 70 Gonzalo Correal abrió la perspectiva precerámica en los estudios bioantropológicos y paleopatológicos, profundizando en casi 10.000 años el conocimiento sobre los cazadores recolectores (Tequendama, Sueva) (Correal, 1974; Correal, van der Hammen, 1977; Correal, 1979) y plantadores tempranos (Correal, 1990). Analizando la variabilidad craneofacial de Tequendama (V-IV milenio a.C.) se advertía que ésta se podría explicar si se partía del “presupuesto de una posible mezcla o fusión de tipos morfológicamente diferentes, desde muy temprana época; pero para una correcta

interpretación, hay que tener en cuenta que esta heterogeneidad, además de estar influida por el simple factor mestizaje, deriva además, de respuestas adaptativas al medio ambiente” (Correal, van der Hammen, 1977: 147). Igualmente se consideraba la posibilidad de la incidencia de la dieta alimenticia en el proceso de evolución de los dolicocefalos (precerámicos) a braquicefalos (agroalfareros tardíos) (Op. cit.: 129-130).

La forma dolicocefálica persistió en pobladores del período Arcaico de la sabana de Bogotá (Ardila, 1984) hace cerca de 5.000 años, y en el Formativo Temprano (Herrera Temprano) en Madrid, Cundinamarca, con fecha 150 ± 50 a.C. (Rodríguez, Cifuentes, 2005).

Desde los años 80 la sistematización y análisis de los restos óseos recientemente excavados en diversos cementerios prehispánicos del país, y de las colecciones óseas de los museos de Bogotá (Museo Nacional, Instituto de Ciencias Naturales y Laboratorio de Antropología Física de la Universidad Nacional de Colombia), Tunja (Museo Arqueológico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia), Sogamoso (Museo Arqueológico), Bucaramanga (Casa de Bolívar) y Darién (Museo Arqueológico Calima del INCIVA), ha permitido ampliar nuestro conocimiento sobre los territorios ocupados por los grupos Muisca (Bogotá, Tunja, Sogamoso), Guane (Mesa de Los Santos), Lache (Sierra Nevada del Cocuy), Chitarero (Santanderes), Panche (Provincia Alto Magdalena de Cundinamarca), Isnos (Huila), Valle del Cauca (Temprano y Tardío), región Caribe (bajo Magdalena, Guajira) y Formativo del altiplano Cundiboyacense (Herrera) (Galarza, 1981; Sacchetti, 1988; Rodríguez, 1987, 1992, 2001, 2005; Segura, Quiñones, 1998). Igualmente la aparición de fosas comunes en contextos de violencia ha permitido conocer la variabilidad ósea de las poblaciones contemporáneas (Rodríguez, 2004; Rosique *et al.*, 2005).

El análisis multivariado de varios grupos de Colombia comparados con otras regiones de América, Asia, Australia, Melanesia y Polinesia, ha permitido plantear una variación geográfico-morfológica distribuida en tres grandes conglomerados: 1. Paleo-Centro-Suramérica, siendo la primera oleada migratoria procedente de la región Pribaikal en Siberia, de tipo mesomorfo (combinación de rasgos mongoloides y australo-caucasoides), ocurrida en un período cercano a los 20.000 años cuando surgió la variante sinodonte (dientes en pala) en Siberia. 2. Norteamérica (praderas y bosques), en una segunda instancia, con rasgos cercanos a los polinesios. 3. La variante circunártica (Great NorthWest Coast) al estar más próxima a las poblaciones del NE de Asia (Chukchi, Yakut, Buriat) y aleutianos-esquimales, constituiría la última

oleada migratoria, más tardía, en un momento cuando las poblaciones siberianas se habían especializado en rasgos mongoloides (rostro aplanado y muy ancho). Por su cercana similitud con la población circunantártica (Patagonia, Tierra del Fuego) de Suramérica se ha considerado el papel que la convergencia adaptativa a ecosistemas árticos jugó en el modelado de esta afinidad morfológica. Finalmente, se aprecia un proceso de braquicefalización y gracilización acentuado durante el período Formativo (Rodríguez, 2001).

Respecto al poblamiento de Colombia se ha señalado un proceso similar al de la distribución de las familias lingüísticas (Ortiz, 1965). Por un lado, la distribución de la familia Chibcha correspondería a la ruta de migración de los primeros pobladores que habrían ascendido por el valle del río Magdalena, remontándose un grupo hacia los Andes Orientales por el valle del río Sogamoso-Chicamocha, dando origen a la variabilidad Chibcha Septentrional (Muisca de Tunja y Sogamoso, Guane, Lache, Chitarero); otro por el valle del río Bogotá, dando origen a la diversidad Chibcha Meridional (Muisca Bogotá) (Rodríguez, 2001). Posteriormente, los grupos de cazadores recolectores habrían traspasado la cordillera Central, extendiéndose por el valle del río Cauca hacia el sur (Rodríguez, 2005).

De esta manera, gracias a este interés bioantropológico, los estudios de la diversidad poblacional de Colombia, en el tiempo y el espacio, desde la perspectiva craneométrica, han contribuido al esclarecimiento de tres problemas antropológicos: 1. Los orígenes y proceso de poblamiento del territorio colombiano durante la época prehispánica, 2. Los orígenes de los paleoamericanos o primeros pobladores de América, y 3. Las principales tendencias evolutivas de sus actuales poblaciones.

La discusión sobre los orígenes de la población antigua de Colombia ha girado en torno al difusionismo y microevolucionismo. Los difusionistas se han apoyado en la versión de G. Reichel-Dolmatoff (1956) sobre un supuesto arribo reciente de la población chibcha mediante oleadas migratorias tardías provenientes de la costa Caribe. Por su parte, R. Lleras (1995) ha planteado la existencia de tres oleadas migratorias que habrían dado origen sucesivamente a los cazadores recolectores, los alfareros tempranos y tardíos, basándose en rasgos formales de la cerámica (la incisión) y en el proceso de diferenciación lingüístico.

También desde la perspectiva craneométrica se han desarrollado planteamientos difusionistas. Mediante la revisión de algunos cráneos prehispánicos de Colombia A. Sacchetti (1988) estableció una tipología, cuyos

demotipos revelarían su divergencia temporal, y cuyos orígenes geográficos estarían relacionados con Mesoamérica, penetrando por las cordilleras colombianas para dar origen a las poblaciones de cazadores recolectores y a las agrícolas tardías.

Los microevolucionistas se han apoyado básicamente en datos biológicos (óseos y genéticos), además de ecológicos, señalando un proceso de diferenciación entre los últimos cazadores recolectores que dio origen a los primeros agroalfareros de los Andes Orientales (Rodríguez, 1987, 1992, 2001, 2005).

En términos generales, la discusión sobre los orígenes de los primeros americanos ha suscitado diversas posiciones que se centran alrededor de cuatro problemas: 1. El tiempo, 2. El espacio, 3. El tronco ancestral y 4. Los procesos biológicos que le acompañaron.

Respecto al tiempo, las posiciones se han dividido entre los que apoyan una cronología superior a los 12.000 años de antigüedad, y aquellos más conservadores que se basan en fechas cercanas a este margen (Pompa y Padilla, Serrano, 2001).

Referente al espacio, se ha discutido sobre su procedencia predominante del noreste asiático (Rodríguez, 1987), la posibilidad de admitir influencias de Australia y Melanesia (Pucciarelli, Neves, 1991; Powell, Neves, 1999; Neves *et al.*, 2007) y de la misma Europa (Begley, Murr, 1999). Igualmente si el paso por la región de Beringia y su penetración al continente americano se hizo por el corredor interglacial (Laurentia y Cordillera) o por la vía costera (Grühn, 1989).

En lo pertinente al tronco ancestral se ha planteado que los primeros pobladores (paleoamericanos) no se caracterizan por rasgos muy mongoloides, lo que podría interpretarse como un origen diferente respecto de las poblaciones asiáticas, posiblemente australoide (Neves *et al.*, 1999; Neves *et al.*, 2007), inclusive polinesio (Begley, Murr, 1999), o simplemente que la primera oleada migratoria se presentó en un tiempo tan profundo cuando las poblaciones cercanas al lago Baikal no se habían diferenciado morfológicamente (protomorfos) (Rodríguez, 2001) o se habían mezclado entre mongoloides y caucasoides (hibridación) (Kozintsev *et al.*, 1999).

Igualmente, la amplia diversidad poblacional americana que incluye grupos muy mongoloides con rostro muy ancho y aplanado (circunárticos, circunantárticos), otros menos mongoloides (Norteamérica, Centro-Suramérica) o inclusive con tenues rasgos australoides (paleoamericanos) o caucasoides (Sioux de Estados Unidos o Guane

de Colombia), se habría originado, sea por proceder de diferentes oleadas migratorias (desde la propuesta de tres por Greenberg *et al.*, 1986), por procesos de reestructuración poblacional (adaptación a diversos ecosistemas), o por ambos procesos. Algunos han llegado a proponer que los paleoamericanos se derivaron de una población asiática no diferenciada que no fue ancestral a los indígenas americanos contemporáneos, o contribuyó muy poco con su morfología, y que el proceso de reestructuración *in situ* jugó un papel muy limitado (Powell, 1993: 814; Powell, Neves, 1999: 177).

Finalmente, el proceso de conformación de la población colombiana ha señalado la presencia de un fuerte componente indígena por línea materna (ADN mitocondrial con haplogrupos A, B, C, D predominantes), y una sustancial participación europea y africana por línea paterna (cromosoma Y), dando lugar a un fenotipo corporal muy diferenciado entre sexos y regiones (Rodríguez, 2004).

La excavación reciente de contextos funerarios tempranos (Valle del Cauca, Cundinamarca, Boyacá) y tardíos (Valle del Cauca, Cundinamarca, Nariño, Atlántico), la incorporación de nuevo material recuperado por el profesor Eliécer Silva Celis alrededor del Templo del Sol (Museo Arqueológico de Sogamoso), permite cubrir mayor distribución temporal y espacial de las poblaciones prehispánicas de Colombia, especialmente de la cordillera Oriental y valle del río Cauca. De esta manera se puede abordar la problemática del poblamiento y evolución de las poblaciones colombianas durante cerca de 8.000 años, con muestras contextualizadas arqueológicamente y estadísticamente más representativas, con el fin de aportar información sobre la discusión entre el migracionismo y el microevolucionismo, tanto en el ámbito de Colombia como de América.

2. Materiales y métodos

Los materiales se componen de 9 muestras prehispánicas provenientes de los Andes Orientales, entre ellas precerámicas de Tequendama, Checua y Floresta (25 individuos) y Aguazuque (35 individuos), fechados entre los milenios VIII-II a.C. Del período Herrera (Formativo), datado entre los siglos II a.C. y IV d.C., provienen 21 individuos de Tunja, Duitama y Madrid. Del período Muisca los materiales proceden de Bogotá (148 individuos), Tunja (82 individuos) y Sogamoso (75 individuos). Igualmente se poseen muestras de Los Santos, área Guane (49 individuos); Cocuy, área Lache (22 individuos); Silos, área Chitarero (14 individuos). Del Valle del Cauca se cuenta con muestras agroalfareras del Bolo Temprano, fechados entre los siglos IV a.C. al V d.C. (38 individuos) y Bolo Tardío, entre los siglos VIII-XVI d.C. (17 indivi-

duos). Del valle del río Magdalena provienen de la región Panche (13 individuos). Se dispone de pequeñas muestras de la serranía de Perijá (Yukpa), Nariño (Tajumbina), Huila (Isnos), región Caribe, Guajira, Quindío, y una muestra contemporánea de una fosa común de Bogotá.

Para la comparación intergrupala se trajeron a colación series craneales de Suramérica (Newman, 1943; Fleury, 1953; Tacoma, 1963, 1965; Lagrange, 1982; Neves, Pucciarelli, 1991; Cocilovo, Guidón, 2000), Caribe (Guinzburg, 1967), Norteamérica (Hrdlicka, 1931, 1940, 1944; Newman, Snow, 1942; Snow, 1948; Neumann, 1952; Newman, 1957; Angel, 1966; Alexeev, 1982; Chatters, 2000), Centroamérica (Genovés, 1970; Romano, 1970), Siberia (Debetz, 1951; Alexeev, Gochman, 1984), Australia (Milecerowa, 1955), Melanesia, Polinesia y Ainu (Japón) (Alexeev, 1974; Howells, 1973, 1989).

A las muestras de Tequendama (Correal, van der Hammen, 1977) y Aguazuque (Correal, 1990) se le agregaron las dimensiones angulares (faciales, nasales). Al primero se le añadieron los materiales de Checua, Cundinamarca, fechados entre 8.500-3.000 años (Groot, 1992) y Floresta, Boyacá, excavados por Eliécer Silva Celis en la vereda La Puerta en 1948. Al segundo se incorporaron los materiales de Vistahermosa, Mosquera (*circa* 3.000 años) (Correal, 1987). Perijá se integró con las muestras de Venezuela (Lagrange, 1982) y Cesar, Colombia (Correal, 1985).

La muestra del período Herrera es muy heterogénea, y se integró con los materiales de Duitama, Boyacá, excavados por Camilo Rodríguez (1999); Tunja, excavados recientemente por Helena Pradilla en predios de la UPTC

(2007, información personal); Madrid, Cundinamarca (Rodríguez, Cifuentes, 2006); Cheva, Boyacá (Pérez, 2001), con fechas entre los siglos II a.C. y IV d.C. Algunos esqueletos de alrededores del Templo del Sol (Monquirá, Sogamoso, Boyacá) ubicados en el Museo Arqueológico de Sogamoso y excavados por Eliécer Silva Celis (1947), a juzgar por una fecha obtenida de hueso de 190±40 d.C., corresponderían al período Herrera (Rodríguez, 2001: 260).

La metodología aplicada contiene tres niveles de análisis: individual, intragrupal e intergrupala, lo que permite abordar problemáticas cada vez más complejas, desde la asignación del sexo y edad a cada individuo, la caracterización por sexos y grupos, la evaluación de las variables más discriminantes, y las relaciones biológicas intergrupales en el tiempo y el espacio.

3. Análisis individual

La estimación del sexo y la edad de las muestras analizadas directamente por el autor (Muisca de Bogotá, Tunja, Sogamoso, Cocuy, Silos, Los Santos, Valle del Cauca, valle del Magdalena, Caribe, Nariño, Huila, Quindío, Herrera) (Rodríguez, 2001, 2005) se estableció según Buikstra *et al* (1994), tratando, en lo posible, de observar totalmente el esqueleto de cada individuo. Las dimensiones craneométricas fueron obtenidas según la metodología de R. Martin (ver Rodríguez, 1994), que presenta algunas diferencias en cuanto a la altura facial superior (medida según Martin de nasion a alveolare y no a prosthion) y al ángulo nasomalar (medido entre frontomalarorbital y no en frontomalar anterior) de W. W. Howells (1989).

Tabla 1. Contexto cronológico y cultural de las muestras craneológicas de Colombia

Período	Cronología	Tecnología	Muestras craneológicas
Paleoindio	IX-IV milenio a.C.	Precerámico Cazadores recolectores	Andes: Tequendama, Checua
Arcaico	III-II milenio a.C.	Precerámico Horticultores	Andes: Aguazuque, Vistahermosa, Floresta (¿), Chía
Formativo Temprano	I milenio a.C.	Ceramista Agroalfareros	Andes: Madrid Valles: Valle Temprano
Formativo Tardío	ss. I-VIII d.C.	Ceramista Agroalfareros	Andes: Duitama, Tunja, Sogamoso, Jericó Valles: Valle Temprano
Agroalfarero Temprano	ss. IX-XII d.C.	Ceramista Agroalfareros	Andes: La Sevillana
Agroalfarero Tardío	ss. XIII-XVI d.C.	Ceramista Agroalfareros	Andes: Muisca (Bogotá, Tunja, Sogamoso), Cocuy (Lache), Los Santos (Guane), Silos (Chitarero); Nariño (SW) Valles: Valle Tardío, Quindío, V. Magdalena, Huila NE: Caribe, Guajira, Perijá
Colonial	ss. XVII-XIX	Cerámica colonial Herramientas metálicas	Catedral de Pereira
Contemporáneo	Actual	Industria	Mestizo de Bogotá

Tabla 2. Listado de las variables craneométricas empleadas en la caracterización de las muestras

No. Martin	W. W. Howells	Medida	No. Martin	W. W. Howells	Medida	No. Martin	W. W. Howells	Medida
1	GOL	D. a-p. máx.		ZMB	A. zma		MDH	Al. Mastoidea iz.
8	XCB	A. transv. máx.		SSS	S. zma		MDH	Al. Mastoidea d.
5	BNL	L. nasiobasion		XML	L. malar		MDB	A. mastoidea iz.
17	BBH	Al. basibremática		MLS	S. malar		MDB	A. mastoidea d.
9	MFB	A. frontal mín.		WMH	A. malar	65	BCB	A. bicondilar
10	XFB	A. frontal máx.	60	MXL	L. maxiloalveolar	66	BGB	A. bigoniaca
11	BAU	D. biauricular	61	MXB	A. maxiloalveolar	68	MAL	L. mandibualr
12	ASB	D. biastérico	51	OMF	A. orbital mf	69	MEH	Al. mentón
29	FRC	C. frontal	52	OBH	Al. orbital	69.2	MCH	Al. cuerpo mand.
FS	FRS	S. frontal	54	NLB	A. nasal	69.3	MCT	Grosor cuerpo
	GLS	Proy. glabellar	55	NLH	Al. nasal	71a	RMB	A. mín. rama
	SOS	Proy. supraorbital	75.1	NFA	Ang. nasofacial	70	RAH	Al. rama
30	PAC	C. parietal	44	EKB	A. biorbital ec	70a	RPH	Al. proy. rama
31	OCC	C. occipital	50	IOB	A. interorbit. mf	79	RAA	Ang. rama asc.
OS	OCS	S. occipital	MF	MFS	S. mf	77	FMA	Ang. fmo
7	FOL	L. foramen mag.	49a	DKB	A. dacrial		ZMA	Ang. zma
16	FOB	A. foramen mag.	DS	NDS	S. dacrial		SIA	Ang. simótico
40	BPL	L. basioprostion	57	WNB	A. simótica			
45	ZYB	A. bicigomática	SS	SIS	S. simótica			
48	NAH	Al. nasoalveolar	FC	FCD	Prof. fosa canina			
47	NGH	Al. facial total		ALC	C. alpha			
43	FTB	A. fmt		ALS	S. alpha			
43.1	OFB	A. fmo		ZOC	C. zygoorbital			
	OFS	S. fmo		ZOS	S. zygoorbital			

Las medidas empleadas corresponden a las de la tabla 2, tratando de abarcar todas las dimensiones de la bóveda craneal y esqueleto facial (diámetros o longitudes, anchuras, alturas, cuerdas o longitudes de coordinación, subtensas o alturas de coordinación y ángulos). Se excluyeron los radios (medidos desde el agujero acústico externo) pues presentan una alta correlación con las demás medidas por lo que se constituyen en lastre estadístico (Rodríguez, 2001). La técnica de medición se ha venido calibrando desde hace 20 años para evitar los errores intra-interobservador.

Se ha sugerido que en los estudios filogenéticos se trate de evitar la homoplasia (convergencia, paralelismo, reversión) pues produce "ruido" en la información empleada en la construcción de las filogenias (Freeman, Herron, 1998: 367). Si bien es cierto que en algunos casos no se conoce el origen de los caracteres (primitivo o derivado), no obstante se puede evitar o reducir el sesgo mediante el uso de un amplio conjunto de rasgos independientes unos de otros, que maximicen la variabilidad intergrupar y que sean derivados de un ancestro común. Así, mientras que la dolicocefalia es un rasgo primitivo de los grupos Paleoamericano, Arcaico y del Formativo temprano, al igual que el prognatismo facial y macrodoncia, el aplanamiento facial de las poblaciones circunárticas y de Siberia constituiría un rasgo derivado adaptativo.

Desde la perspectiva metodológica son varios los problemas en el estudio craneométrico de la problemática del poblamiento americano. En primer lugar, incide el tamaño de las muestras pues muchas veces son individuos o un número muy reducido, afectando primordialmente la representatividad femenina; muchas muestras son masculinas, desconociéndose la variación del otro sexo. En segundo lugar la deformación craneal que practicaban varias poblaciones de los valles interandinos (Magdalena, Cauca), la Mesa de los Santos, Santander, en la región Caribe, en las cordilleras Central (Quindío) y Oriental (Soatá, Tunja, Samacá) y en el altiplano Nariñense, afecta las dimensiones de la bóveda craneal (diámetros anteroposterior máximo, transverso máximo, anchura frontal máxima, altura basibregmática, cuerdas y subtensas frontal y occipital), introduciendo un sesgo en las comparaciones. En tercer lugar, el número de variables es muy pequeño, muchas veces se concentran en la bóveda craneal, las que por un lado están afectadas por la deformación craneal, y, por otro, no son muy discriminadoras en la comparación de grupos separados temporal y espacialmente. Finalmente, las comparaciones intergrupales no emplean muestras de distintas regiones y períodos, lo que no permite explorar las similitudes y diferencias en un amplio espectro. Por ejemplo, si se comparan los paleoamericanos entre euro-

peos y australianos, con variables básicamente de la bóveda craneal, indudablemente mostrarán más correspondencias con estos últimos; pero si se añaden muestras de la misma región y con mayor número de variables faciales, los resultados serán diferentes pues el análisis estadístico descarta las dos primeras regiones.

Por ejemplo Powell y Neves (1999) emplean 15 variables, de ellas 9 (60%) de la bóveda craneal. Cuando se acude a las faciales para evitar el sesgo de la deformación craneal, el conjunto de rasgos se reduce a unos pocos. Así, Rothhammer y colaboradores (1984) y Cocilovo y Guichón (2000) utilizan tan solo 7 rasgos faciales. Por esta razón, dado que la mayor similitud entre australo-melanesios y paleoamericanos es de tipo neurocraneal, al tener este componente un peso específico mayor, siempre tenderá a conectarlos morfológicamente en los dendrogramas de correlaciones, aún si se aplican las medidas craneofuncionales (González *et al.*, 2001). Estas últimas tienen el sesgo de mostrar solamente los perfiles faciales y neurocraneales, sin profundizar en el conjunto craneofacial.

Por estas razones, en el presente análisis se trató de incluir el mayor número de muestras que cubrieran toda América y regiones vecinas de Siberia, Australia, Melanesia y Polinesia, analizando el comportamiento de una batería de rasgos más amplia, y con mayor peso específico en el componente facial.

4. Análisis intragrupal

Las muestras se analizaron independientemente por sexo, teniendo en cuenta solamente los individuos adultos. Con los datos se estructuró una base de datos bajo el programa SPSS versión 12, con variables numéricas y categóricas y se sometió a análisis de estadísticos descriptivos; correlaciones bivariadas para observar las relaciones entre las variables; pruebas para muestras independientes (Kolmogorov-Smirnov, Kruskal-Wallis) para evaluar las diferencias entre sexos y grupos; análisis discriminante para evaluar la pertenencia espacial y temporal; análisis factorial para identificar aquellos factores que expliquen la mayoría de varianza observada; y de conglomerados jerárquicos (distancia euclídea al cuadrado, método de Ward, estandarización mediante puntuaciones Z) para observar la clasificación de los distintos grupos ilustrados mediante dendrogramas. Las variables se estandarizaron previamente según las puntuaciones Z (Shennan, 1992; Pietrusewsky, 2000).

4.1. Variación sexual

Según la prueba Kolmogorov-Smirnov (Tabla 3) prácticamente todas las variables participan en la diferencia-

ción por sexo, exceptuando las subtensas (FRS, OCS, MLS) y ángulos (NMA, ZMA), la profundidad de la fosa canina (FC) y la anchura simótica. Mediante la prueba Mann-Whitney se excluyen también el ángulo NFA, las cuerdas frontal (FRC), parietal (PAC) y occipital (OCC), la anchura del foramen magno y la altura orbital. Las anchuras faciales (bicigomática, biorbital, fmo, fmt, zma), orbital y nasal, y las craneales frontal mínima y biauricular son las más adecuadas para esta diferenciación; igualmente la proyección glabellar y supraorbitaria. De las alturas sobresale la del proceso mastoideo, al igual que su anchura y la nasoalveolar. De las longitudes son discriminantes las del foramen magno, basioprostion, malar y maxiloalveolar. Entretanto, los ángulos y las subtensas como la altura nasal y orbital no son apropiadas para este proceso.

Aplicando un análisis discriminante se produce una sola función canónica discriminante con significado asintótico menor de 0,05 y que permite clasificar correctamente el 94,7% de los individuos masculinos y el 100% de los femeninos, siendo un modelo de pronóstico muy acertado. La función incluye en orden de tamaño las longitudes de la base del esqueleto facial y malar, las anchuras faciales frontal mínima, fmo, fmt, bicigomática, biorbitales nasal, cigomaxilar y orbitaria, la proyección supraorbitaria y la altura nasal.

4.2. Variación intergrupala

Al comparar todos los grupos colombianos masculinos encontramos que las anchuras (biauricular, biorbital, bicigomática, transversa máxima, fmo, orbitaria, frontales máxima y mínima, dacrial, fmt, nasal, biastérica, interorbitaria, cigomaxilar, maxiloalveolar) son las variables más apropiadas para diferenciarlos en el primer componente; de las alturas la orbitaria. Las longitudes, cuerdas, alturas y subtensas se ubican en el segundo y tercer componente. Los ángulos faciales se agrupan en el cuarto componente. La altura y anchura del proceso mastoideo no es muy discriminadora entre grupos (Tabla 4).

Para abordar la problemática intergrupala (regional) se procedió a aplicar un análisis de taxonomía numérica mediante conglomerados jerárquicos, utilizando la distancia euclídea al cuadrado y construyendo los dendrogramas mediante el método de aglomeración de Ward. Se usaron 43 variables, entre ellas 19 que dan cuenta de las dimensiones en longitud, anchura, altura y proyección de la bóveda craneal (GOL, XCB, BNL, BBH, MFB, XFB, BAU, ASB, FRC, FRS, GLS, SOS, PAC, OCC, OCS, FOL, FOB, MDH, MDHd) y 24 del rostro (BPL, ZYB, NAH, FTB, OFB, OFS, ZMB, SSS, XML, MLS, WMH, MXL, MXB, OMF, OBH, NLB, NLH, NFA, EKB, IOB, DKB, SIS, NMA, ZMA).

Tabla 3. Prueba Kolmogorov-Smirnov para la diferenciación sexual entre grupos colombianos

Variables		GOL	XCB	BNL	BBH	MFB	XFB	BAU	ASB
Diferencias más extremas	Absoluto	,382	,405	,487	,464	,602	,477	,559	,414
	Positivo	,023	,010	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	Negativo	-,382	-,405	-,487	-,464	-,602	-,477	-,559	-,414
Z Kolmogorov Smirnov		1,125	1,192	1,435	1,367	1,774	1,406	1,648	1,222
Significado asintótico		,125	,116	,033	,048	,004	,038	,009	,101

FRC	FRS	GLS	SOS	PAC	OCC	OCS	FOL	FOB	BPL	ZYB	NAH
,395	,497	,559	,507	,276	,549	,191	,612	,289	,645	,717	,697
,000	,497	,000	,000	,000	,158	,181	,053	,053	,062	,000	,000
-,395	-,053	-,559	-,507	-,276	-,549	-,191	-,612	-,289	-,645	-,717	-,697
1,163	1,464	1,648	1,493	,814	1,619	,562	1,803	,853	1,900	2,113	2,055
,133	,028	,009	,023	,521	,011	,910	,003	,461	,001	,000	,000
FTB	OFB	OFS	ZMB	SSS	XML	MLS	WMH	MXL	MXB	OMF	OBH
,602	,602	,322	,632	,401	,559	,276	,342	,674	,434	,592	,530
,000	,000	,092	,000	,053	,000	,062	,030	,000	,000	,000	,000
-,602	-,602	-,322	-,632	-,401	-,559	-,276	-,342	-,674	-,434	-,592	-,530
1,774	1,774	,950	1,861	1,138	1,648	,814	1,008	1,987	1,280	1,745	1,561
,004	,004	,327	,002	,122	,009	,521	,261	,001	,076	,005	,015
NLB	NLH	NFA	EKB	IOB	DKB	NDS	WNB	SIS	FCD	MDH	MDHd
,632	,454	,405	,625	,382	,625	,382	,635	,266	,207	,684	,707
,000	,000	,053	,000	,000	,000	,000	,000	,082	,207	,000	,000
-,632	-,454	-,405	-,625	-,382	-,625	-,382	-,635	-,266	-,122	-,684	-,707
1,861	1,338	1,192	1,842	1,125	1,842	1,125	1,871	,785	,611	2,016	2,084
,002	,056	,116	,002	,159	,002	,159	,002	,568	,850	,001	,000
NMA	ZMA										
,247	,217										
,155	,217										
-,247	-,112										
,727	,640										
,666	,808										

Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis entre grupos colombianos

Variables	GOL	XCB	BNL	BBH	MFB	XFB	BAU	ASB	FRC
Chi cuadrado	16,390	27,349	11,436	17,300	18,003	24,895	21,189	16,803	10,464
df	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Signific. asint.	,059	,001	,247	,044	,035	,003	,012	,052	,314
Variables	FRS	GLS	SOS	PAC	OCC	OCS	FOL	FOB	BPL
Chi cuadrado	17,706	10,254	11,709	15,018	15,156	23,199	7,416	14,297	9,008
df	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Signific. asint.	,039	,330	,230	,090	,87	,006	,594	,112	,437
Variables	ZYB	NAH	FTB	OFB	OFS	ZMB	SSS	XML	MLS
Chi cuadrado	13,230	8,429	12,227	14,641	20,364	8,682	15,139	12,120	14,607
df	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Signific. asint.	,152	,492	,201	,101	,016	,467	,087	,207	,102
Variables	WMH	MXL	MXB	OMF	OBH	NLB	NLH	NFA	EKB
Chi cuadrado	10,341	10,228	18,006	16,180	13,867	14,656	12,500	11,231	15,109
df	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Signific. asint.	,324	,332	,035	,063	,127	,101	,187	,260	,088
Variables	IOB	DKB	SIS	FCD	MDH	MDHd	NMA	ZMA	
Chi cuadrado	12,103	9,116	11,717	10,765	4,031	8,194	17,581	17,616	
df	9	9	9	9	9	9	9	9	
Signific. asint.	,208	,427	,230	,292	,909	,515	,040	,040	

También se aplicó un análisis factorial para establecer qué conjunto de variables explica mejor la variación y cuáles son los grupos más disímiles. Los 5 primeros componentes explican el 71,1% de la variación total. En el primer componente se ubican básicamente las anchuras, en el segundo y tercero las longitudes y alturas, y en el cuarto los ángulos faciales.

Para obtener una visión más regional se construyeron grandes agrupaciones, entre ellas Chibchas del norte (Sillos, Los Santos, Cocuy), Muiscas del norte (Tunja, Sogamoso) y del sur (Bogotá), Precerámico (Tequendama, Aguazuque), Formativo (Herrera, Valle Temprano), Centro (Quindío, Valle Tardío), SW (Huila, Nariño) y NE (Ca-

Tabla 5. Matriz de los 5 primeros componentes principales (71,1% de la variación)

Variable	Componente				
	1	2	3	4	5
Anchura biauricular	,886	,143	-,244		
Anchura biorbital	,858	,265	,353		
Anchura bicigomática	,837		,318	,240	,169
D. transverso máx	,832	-,139	-,223	-,134	
Anchura fronto malar orbital	,805	,458	,302		
Anchura orbitaria (mf)	,798	,132	,334	,142	
Anchura frontal máxima	,773		-,319	-,213	-,138
Anchura frontal mínima	,742	,324	,106	-,230	
Cuerda occipital	-,724		-,249	,344	-,319
Subtensa frontal	-,714	,254	,173	,262	-,106
Anc dacrial	,693		,293	,141	-,237
Anchura fronto malar temporal	,682	,536	,213	,283	-,219
Diámetro antero post máx	-,672	,485	,169	,215	,171
Subtensa occipital	-,652	,449		,152	,395
Cuerda parietal	-,639	,373	,317		,394
Long nasiobasion	-,548	,436	,191	,286	-,180
Altura basibregmática	-,505	,443		,153	-,113
Proyección glabellar		,733	-,382	-,291	-,285
Altura nasal	,145	,702	-,187	-,307	,191
Cuerda frontal	-,594	,672	,113		-,108
Long malar	,105	,665	,460	,335	
Proyección supraorbital		,626	-,142	-,212	,467
Altura nasion alveolar		,599			,167
Anchura nasal	,541	,583	,234	,225	,299
derecha	-,171	,575	,148	-,548	-,260
Subtensa malar		,558	,245	,169	-,409
Longitud basiprosthion	-,112	,511	,162	,425	,378
Prof fosa canina	,128	,189	-,675	,130	-,110
Altura mastoidea	-,333	,332	,603	-,455	-,249
Subtensa cigomaxilar anterior	-,303	,454	-,598	-,335	,249
Anchura biastérica	,455	,316	-,552		
Anchura interorbitaria	,508	,397	,515	-,208	-,171
Angulo nasofacial	,171	-,134	,478	-,460	-,353
Anchura foramen magno	,136	,248	-,475	,414	-,435
Anchura cigo maxilar anterior	,300	,194	-,418	,367	,144
Longitud maxilo alveolar	,406	,212	-,415		,375
Subtensa fmo		,337		-,844	
Ang nasomalar	,190	,126	-,240	,824	,138
Ang cigomaxilar	,263	-,151	,180	,707	
Anc simótica		-,344	,438		,628
altura orbitaria	,480	,188		-,357	,528
altura malar	-,148	,324		,222	-,514
Anchura maxilo alveolar	,385	,304	-,431	,128	-,457
Long foramen	-,224	,440	-,403		

ribe, Guajira, Perijá), que fueron sometidos a un análisis discriminante para establecer la posibilidad de construcción de modelos diagnósticos según el conjunto de características observadas. Se aprecia que los muiscas y otros chibchas se agrupan en un conjunto mayor con los precerámicos y Centro; entretanto la agrupación NE se distancia de todas las demás; un poco menos el Formativo del Valle y el conjunto SW. Esto significa que la diferenciación espacial es más importante que la temporal pues el Precerámico se agrupa con los grupos tardíos de los mismos Andes Orientales, por lo que estos últimos deben compartir un ancestro común (Tabla 6, Figura 1).

Los dendrogramas construidos a partir del análisis de conglomerados jerárquicos con los componentes principales obtenidos del procedimiento factorial (Figuras 2, 3), ilustran sobre las relaciones entre los distintos grupos colombianos, tanto masculinos como femeninos. Con alguna variación, ambas figuras muestran una gran cercanía

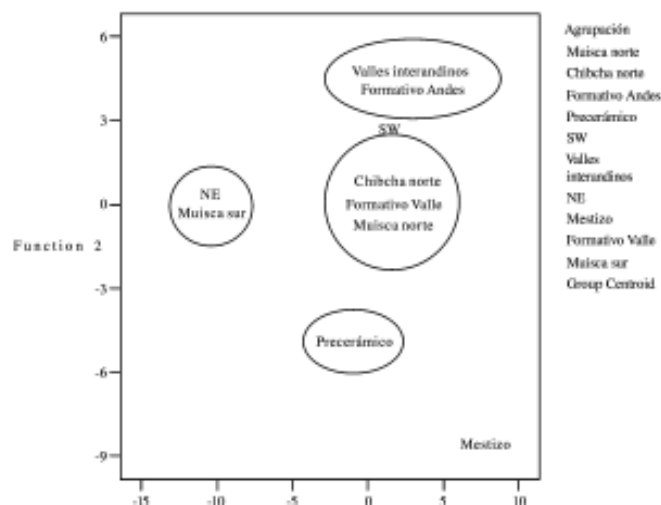


Figura 1. Funciones canónicas discriminantes entre agrupaciones regionales y temporales de Colombia.

Tabla 6. Comparación discriminante entre agrupaciones (6 grados de libertad para el paso 4)

Agrupación	F	Muisca norte	Chibcha norte	Formativo Andes	Precerámico	SW	Valles interandinos	NE	Mestizo	Formativo Valle	Muisca sur
Muisca norte	F		0,79	4,95	3,29	2,05	13,45	28,27	13,86	2,28	0,89
	Sig.		0,57	0,04	0,09	0,21	0,00	0,00	0,00	0,18	0,52
Chibcha norte	F	0,79		3,51	4,92	2,21	17,66	25,45	21,19	4,44	0,19
	Sig.	0,57		0,08	0,04	0,18	0,00	0,00	0,00	0,05	0,93
Formativo Andes	F	4,95	3,51		10,08	2,24	6,46	13,32	24,57	6,39	2,27
	Sig.	0,04	0,08		0,01	0,18	0,02	0,00	0,00	0,02	0,18
Precerámico	F	3,29	4,92	10,08		10,04	30,50	25,14	15,95	7,26	2,89
	Sig.	0,09	0,04	0,01		0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,12
SW	F	2,05	2,21	2,24	10,04		5,54	31,08	18,65	2,36	1,70
	Sig.	0,21	0,18	0,18	0,01		0,03	0,00	0,00	0,17	0,27
Valles interandinos	F	13,45	17,66	6,46	30,50	5,54		69,97	24,48	4,41	9,34
	Sig.	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03		0,00	0,00	0,05	0,01
NE	F	28,27	25,45	13,32	25,14	31,08	69,97		60,77	31,30	11,19
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,01
Mestizo	F	13,86	21,19	24,57	15,95	18,65	24,48	60,77		6,30	15,11
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,02	0,00
Formativo Valle	F	2,28	4,44	6,39	7,26	2,36	4,41	31,30	6,30		3,42
	Sig.	0,18	0,05	0,02	0,02	0,17	0,05	0,00	0,02		0,09
Muisca sur	F	0,89	0,19	2,27	2,89	1,70	9,34	11,19	15,11	3,42	
	Sig.	0,52	0,93	0,18	0,12	0,27	0,01	0,01	0,00	0,09	

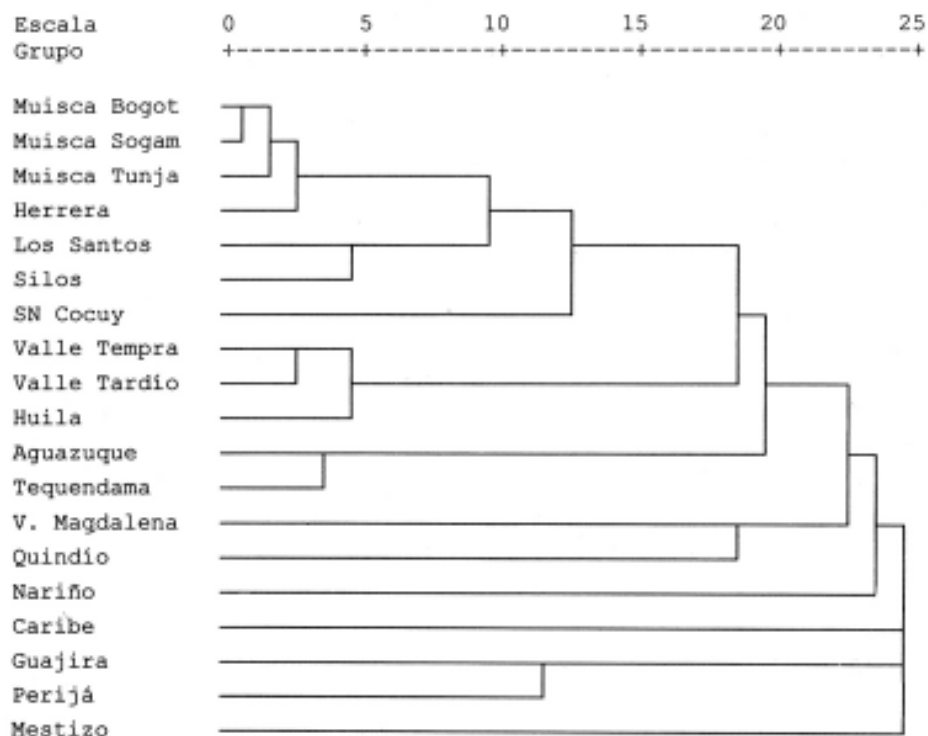


Figura 2. Dendrograma de distancias euclídeas al cuadrado usando el método de Ward. Grupos masculinos.

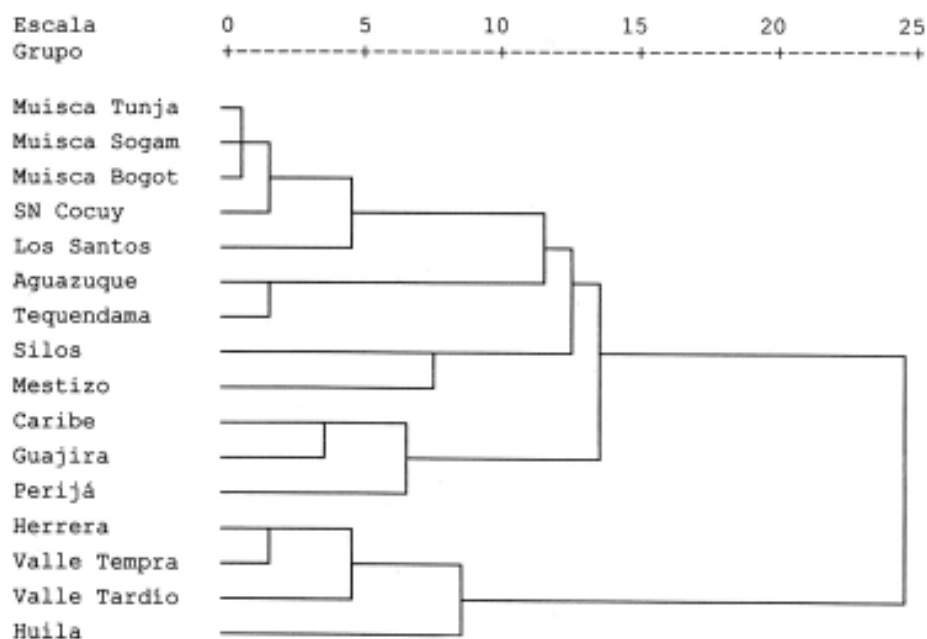


Figura 3. Dendrograma de distancias euclídeas al cuadrado usando el método de Ward. Grupos femeninos.

entre los grupos de los Andes Orientales, tardíos y precerámicos, y, en menor medida con los del Valle (Temprano y Tardío) y Huila, señalando que en alguna época debieron compartir un tronco ancestral común.

El grupo Herrera (Formativo) ubicado temporalmente entre finales del I milenio a.C. y principios del I milenio d.C. asume una posición indefinida, pues en el dendrograma masculino se aglomera con los chibchas, mientras

que en el femenino a los del Valle, aunque se aproxima más -por poseer las menores distancias- a los precerámicos (especialmente Aguazuque), andinos (particularmente Muisca de Tunja) y del Valle (temprano y Tardío). Su posición incierta obedece a que observa una amplia variabilidad, especialmente en lo referente a la bóveda craneal, pues el índice cefálico oscila entre la dolicocefalia de algunos individuos de Madrid 2-41, Cundinamarca (72,4 en el individuo 11 del Corte 0), hasta la braquicefalia con deformación cefálica intencional -fronto-occipital tabular oblicua- (96,3 del individuo de la cuadrícula F6/7 de la Unidad 1). Igualmente el índice cefálico de la muestra de Cheva, Jericó, Boyacá (Pérez, 2001), oscila entre 75,4 y 82,2. Entretanto, las muestras de Chucua (San Lorenzo Abajo), Duitama, y Tunja (UPTC), Boyacá, con completamente braquicéfalas. Esto señala que la población del período Formativo se encontraba en un proceso de recomposición morfológica de su estructura craneal bajo fuerzas selectivas, donde, de características dolicocefalas de los cazadores recolectores, se evolucionó a braquicéfalas de las poblaciones agroalfareras tardías.

Como hemos venido argumentando desde hace dos décadas (Rodríguez, 1987, 1992, 2001), los análisis craneométricos apoyan la hipótesis de continuidad biológica entre los paleoamericanos y los agroalfareros tempranos y tardíos, por lo menos en los Andes Orientales, pues por un lado se evidencia la conformación de un conglomerado poblacional de tipo andino (chibchoide) diferente a sus vecinos de tierras bajas -lo que señala la gran profundidad temporal en su estructuración-, y, por otro, se aprecia que los paleoamericanos se aproximan más a los andinos tempranos y tardíos que a los de los valles interandinos y costa Caribe. Además, la población del período Formativo (Herrera) refleja el proceso de microevolución entre los cazadores recolectores y plantadores tempranos (dolicocefalos) a los agroalfareros (braquicéfalos). Con la nueva información se establece además un parentesco también con la población del Valle del Cauca, especialmente con la temprana.

De esta manera, se podrían plantear unas rutas de poblamiento del territorio colombiano. Los primeros pobladores habrían penetrado por el istmo de Panamá hacia el sur por la costa Caribe, con una rama desplazándose hacia la península de la Guajira y otra hacia el interior del país, por lo que sabaneros (Orinoquia de Venezuela y Colombia) y andinos comparten un tronco ancestral remoto común. Posteriormente habrían ascendido por el valle del río Magdalena, habiendo tomado el curso de los ríos Sogamoso y Chicamocha hacia los Andes Orientales, por el norte, y por el sur por el valle del río Bogotá, lo que

explicaría la diferenciación entre el norte y el sur -siendo el norte más heterogéneo que el sur-, compartiendo lazos sanguíneos después, lo que explicaría también la conservación de un componente andino (chibchoide) relativamente homogéneo a nivel interregional, aunque heterogéneo en el intraregional. Algunos grupos como los ancestros del grupo étnico Guane de la Mesa de Los Santos, Santander se habrían aislado entre la cordillera de Los Cobardes o Yaregués, el cañón del Chicamocha y las estribaciones NW de la cordillera Oriental, desarrollando rasgos muy específicos, diferentes de sus vecinos muisca. Finalmente, del tronco Andino se habrían desprendido algunos grupos que traspasaron la cordillera Central y ascendieron por el valle del río Cauca, lo que explicaría la gran similitud entre andinos y vallecaucanos. Con el tiempo grupos de procedencia Karib habrían influido en el valle del río Cauca, especialmente en las regiones cordilleranas (Rodríguez, 2005).

Así, las migraciones tempranas desde Centroamérica (paleoamericanas) y las tardías hacia la cordillera Central (de origen Karib), la escisión de linajes hacia la Orinoquia, Andes y valles interandinos con la consecuente adaptación milenaria a esos ecosistemas y el aislamiento de algunos grupos (en la Mesa de Los Santos, Santander) en entornos geográficos montañosos, constituyeron los principales mecanismos evolutivos del proceso de conformación de la variabilidad poblacional prehispanica de Colombia.

Como se sabe por las fuentes etnohistóricas, las redes de intercambio jugaron un papel importante en la consolidación de los lazos comerciales, sociales, políticos, religiosos, militares y biológicos, tanto al interior de las confederaciones muisca (Bacatá, Hunza, Duitama, Sugamuxi), como con comunidades vecinas chibchas y de otros grupos lingüísticos. Sin embargo, el proceso de surgimiento y consolidación de la sociedad Muisca no fue homogéneo por la gran diversidad de poderes locales. Las dos confederaciones más fuertes, Bacatá y Hunza, eran muy diferentes como bien lo explica fray Pedro Simón (1981, IV: 158):

“[...] no solamente eran diferentes en los ánimos, trayendo sangrientas guerras entre los dos [...] sino también en las lenguas, porque aunque convenía en algunos vocablos, eran tan pocos que se entendían muy poco los unos de los otros [...] no tenían lengua común en sus tierras sino que cada pueblo hablaba con su idioma diferente [...] Si lo tenían de ventaja los bogotaes que se entendía un poco más su lengua, pues se hablaba en toda la sabana que ahora llamamos Bogotá [...] en saliendo de la sabana y sus pueblos a cualquier parte, comienzan mil di-

ferencias [...] y cuanto más se van desviando de ella, mayores van siendo las diferencias hasta venirse a no entender unos a otros”.

Por su parte, la etnia Guane era muy diferente en cuanto su aspecto físico. Al respecto Juan de Castellanos (1997:1242) destaca su hermosura, compostura, gracia, donaire y blancura:

“Eran a las demás aventajadas en la disposición y hermosura, aire, donaire y atavío [...] Tienen disposición y gallardía y es gente blanca, limpia, curiosa, los rostros aguileños y facciones de linda y agraciada compostura; y las que sirven a los españoles es de maravillar cuan brevemente toman el idioma castellano, tan bien articulados los vocablos como si les vinieran por herencia; primor que yo jamás he visto, en las otras naciones de las Indias”.

Fray Pedro Simón (*Op. cit.* IV: 22-23) describe a los mismos guanés de la siguiente manera:

“Son los indios tan bien dispuestos, de buenas caras y más blancos que colorados...Las mujeres son de muy buen parecer, blancas y bien dispuestas y más amorosas de lo que era menester, en especial con los españoles [...] era la (gente) más lucida de todos aquellos valles. De que hicieron demostración con sus bríos, en especial las mujeres, que eran de mucha hermosura y aseo en su vestir, gracia y donaire en su hablar”.

Por su lado, los laches de la Sierra Nevada del Cocuy, a pesar de ser de la misma filiación lingüística Chibcha (Ortiz, 1965), y de poseer un Templo del Sol a donde acudían en romería los indígenas de Sáchica y Sogamoso, también se diferenciaban de los muiscas, pues como apuntaba Pedro Aguado (1956:332-333) eran diferentes cultural y somáticamente:

“Esta gente Lache, así en personas como en trajes, lengua y habla, supersticiones de religión [...] y demás de esto hacían gran ventaja a los Moxcas, así en la grandeza y disposición de cuerpos como en las armas, que eran más peligrosas y largas que las que los Moxcas usaban”.

5. Las poblaciones prehispánicas de Colombia en el ámbito mundial

Una vez abordada la problemática del poblamiento regional de Colombia, podemos pasar a un nivel de análisis más complejo como es la posición taxonómica de los grupos locales en el ámbito suramericano y del Nuevo Mundo en general. El análisis intergrupar de conglome-

rados jerárquicos, empleando 69 muestras masculinas de América, Asia (Siberia), Australia, Melanesia y Polinesia y Japón, con las variables obtenidas de los componentes principales (5 craneales: GOL, XCB, BNL, BBH, MFB; 11 faciales: BPL, ZYB, NAH, OMF, OBH, NLB, NLH, NFA, FMA, ZMA, SIA) mediante distancias euclídeas al cuadrado y el método de Ward, evidencia la conformación de dos grandes conglomerados: América y su raíz ancestral Siberia, por un lado, y Australia-Melanesia-Zhoukoudian, muy distante, por otro. El primero se subdivide a su vez en 5 enjambres (Figura 7).

El análisis factorial construye 5 componentes principales que representan el 76,6% del total de la variación. El primer componente incluye básicamente medidas lineales (longitudes, alturas, anchuras) que son la mayoría del total de 16 variables, el segundo vincula el diámetro anteroposterior máximo, la anchura bicigomática y frontal mínima, y el tercero, cuarto y quinto incluye las dimensiones angulares.

Según las funciones discriminantes obtenidas que clasifican correctamente el 88,2% de los grupos masculinos de América, Asia, Pacífico y Australia-Melanesia, los americanos se integran en un gran conglomerado, aunque Patagonia, Circunártico y Norteamérica (Arcaico, Tardío) se aproximan a Siberia, especialmente por la función 1 (anchuras nasal, orbitaria, bicigomática, longitud basio-prosthion) que representan básicamente las dimensiones transversales faciales; es decir, comparten rasgos mongoloides lineales (Figura 4). Al conglomerado Pacífico (Polinesia, Ainu) se integran por la función 2 (ángulos nasomalar, cigomaxilar, nasofacial), pero se separan por la 1, señalando que poseen rostros menos aplanados que los mongoloides, perfilados como las poblaciones del Pacífico, apuntando quizás a convergencia adaptativa en ambientes tropicales. Los grupos de Valles interandinos se distancian del resto americano por la función 2, aunque se aproximan a los del Caribe. Zhoukoudian, Australia-Melanesia y de América el Paleamericano Norte constituyen los grupos más diferente por ambas funciones.

Por las distancias Mahalanobis el grupo Paleamericano del Sur se aproxima a los grupos de Amazonia ($F= 0,6$), Arcaico (Sur y Norte) ($F= 1,5$), Pacífico ($F= 1,5$), Formativo ($F= 2,7$) Andes Norte y Orinoquia ($F= 3,5$); de Australia-Melanesia se distancia un poco más ($F= 4,3$), al igual que de Siberia ($F= 4,5$). Circunártico, Patagonia y Siberia están muy próximos entre sí; Orinoquia y Caribe se aproximan entre sí, y, en menor medida a Valles interandinos. En los últimos pasos las anchuras bicigomática, orbital y el ángulo nasofacial incrementan las diferencias entre grupos.

Este análisis discriminante señala de una manera evidente la continuidad biológica entre paleoamericanos y arcaicos, descartando la supuesta discontinuidad; relaciona las poblaciones Centro-Suramericanas, especialmente la Botocudo (Amazonas) con las más antiguas, planteando que esta región presenta en el ámbito continental un poblamiento más antiguo con relación a Norteamérica, y la existencia de relictos; que la convergencia adaptativa a un medio ambiente de frío riguroso explicaría la afinidad fenotípica entre Patagonia, Circunártico y Siberia, y a ambientes tropicales la similitud entre Paleoamericanos y Amazonia con Pacífico y Australia-Melanesia. Zhoukoudian (Paleolítico Superior de China, *circa* 26.000 años), a pesar de la discusión existente sobre su protomorfía, no representa una forma primitiva de los primeros pobladores asiáticos.

En consecuencia, de acuerdo a los resultados del análisis discriminante la participación de un tronco ancestral común (Paleoamericano-Centro-Suramérica), el espacio (Andes, Orinoquia, Caribe) y el tiempo (Paleoamericano-Arcaico), además de procesos adaptativos (Circunárticos) y estocásticos (el aislamiento en determinados ecosistemas) explicarían el proceso de diferenciación de las poblaciones americanas.

En el análisis discriminante que clasifica correctamente el 81,5% de los grupos femeninos, los resultados son similares, aunque existen algunas diferencias. Los Paleoamericanos del sur se aproximan a Arcaico norte, Amazonia, Pacífico, Formativo, Arcaico sur y Andes norte. El grupo Formativo observa las menores distancias con todos los americanos, Siberia y Pacífico, pero se distancia significativamente de Zhoukoudian y Australia-Melanesia. El grupo amazónico Botocudo parece representar una forma arcaica pues se aproxima a todos los demás. Mientras que Norteamérica (tardío) se aproxima a Arcaico y Paleoamericano norte, los grupos Andinos observan una gran similitud con Paleoamericano, Arcaico y Formativo sur. Zhoukoudian y Australia-Melanesia son los grupos más disímiles. El ángulo nasomalar y la longitud basioprosthion son las variables que incrementan las diferencias en los últimos pasos discriminantes. En fin, a grandes rasgos se repiten las conclusiones obtenidas para los grupos masculinos.

5.1. Enjambre Norteamérica-Polinesia

Integrado por grupos norteamericanos tardíos de las praderas (Sioux, Cheyenne, Arikara, Cañaverál), junto a Polinesia. Se caracterizan por su rostro alto, angosto, muy perfilado, con nariz angosta y muy pronunciada. Respecto a Centro-Suramérica la distancia es muy grande, señalando

una dicotomía biológica entre ambas regiones, siendo la sur mucho más heterogénea, y, por consiguiente, más antigua.

5.2. Enjambre Centro-Suramérica

5.2.1. Andes Septentrionales

Está integrado por los descendientes de la primera oleada migratoria que penetró al continente americano, los Paleoamericanos (Lagoa Santa, Brasil, Tequendama y Aguazuque de Colombia, Siboney de Cuba), su relicto los Botocudos contemporáneos de Brasil y Pericú de California, que ocuparon las tierras descubiertas de los casquetes glaciales (Laurentia y Cordillera en Estados Unidos), y que geográficamente se extiende desde el sur de Estados Unidos (California, Arizona, New Mexico, Texas, Florida), Centroamérica y las regiones Andina y Amazónica de Suramérica, de ambientes tropicales seco (sabanas, llanuras), húmedo (selvas) y montano (andino). Su origen se relaciona con poblaciones de Siberia y no de Australia-Melanesia pues comparten con las primeras la presencia predominante de incisivos en pala (más del 90%), cuando en estas últimas su frecuencia es inferior al 10%; también se diferencian por poseer menor tamaño dental (especialmente de incisivos centrales, caninos y molares superiores, y molares inferiores) (Pompa y Padilla, Serrano, 2001; Rodríguez, 2003).

La principal característica de los paleoamericanos es la dolico-hipsicefalia, acompañada de un rostro de rasgos menos mongoloide que los indígenas contemporáneos (rostro más angosto, perfilado, con prognatismo, nariz más ancha), mandíbula muy robusta (rama ascendente ancha y vertical). Posiblemente los Botocudos, por su aislamiento en la selva Amazónica representen un relicto de esas poblaciones paleoamericanas, al igual que el grupo de Las Palmas, Pericú de Baja California Sur, México (González *et al.*, 2001).

Craneométricamente poseen nariz menos ancha y aplanada y menor prognatismo que las australo-melanesias (anchura nasal entre 27-28 mm y 10-20° de ángulo nasofacial), y menor aplanamiento facial que las poblaciones mongoloides siberianas contemporáneas (ángulo fmo entre 144-149° y zma entre 133-142° en estas últimas). Morfológicamente se relacionan más con los hallazgos mexicanos de Chimalhuacán, El Peñón y Tlapacoya, México (fechados entre 33.000-8.000 años a.C.) (Pompa y Padilla, Serrano, 2001), y en Siberia con las poblaciones arcaicas del este del lago Baikal entre los ríos Lena y Amur que no son completamente mongoloides (sea por protomorfía o mesomorfía o por mixtura genética

entre mongoloides y caucasoides) (Alexeev, Gochman, 1984; Kozintsev, 1999).

Dentro de los Andes Septentrionales se ubican las muestras de los Andes Orientales de Colombia (Muiscas, Cocuy, Silos), Huila, y las de las sabanas de la Orinoquia (Guajira, La Pica, Cerro de Luna, Perijá) y Old Zuñi (Pueblo) del suroeste de Estados Unidos. Estas últimas morfológicamente son poblaciones adaptadas a condiciones de sabana o llanuras desérticas, con órbitas altas y anchas (configurando ojos con párpado superior superpuesto y pliegue epicántico, nariz ancha, pómulos muy prominentes y rostro ancho.

La muestra Valle Temprano se aglomera a esta última, aunque sus distancias con los Andes Orientales son muy pequeñas.

La vinculación de poblaciones andinas y sabaneras, por un lado, y los paleoamericanos, por otro, estaría señalando una relación ancestro-descendiente.

5.2.2. Andes Centrales

Está integrado por muestras peruanas serranas (San Damián, Paucarcancha) y costeras (Chicama), Chile (Atacama), y las Arcaicas y Horticultoras (Formativo) de Suramérica, México (Coahuila), Estados Unidos (Indian Knoll).

Las muestras colombianas de Los Santos y Nariño parecen retener características más propias de los Andes Centrales que Septentrionales. La muestra de la isla de Aruba por su vínculo andino parece estar señalando un origen remoto muy antiguo a partir de esta región.

5.3. Caribe

Vincula las muestras Taino (Cuba alfarero), Surinam, Caribe, Agua de Dios (Provincia Alto Magdalena de Cundinamarca), Quindío, Valle Tardío. La inclusión de Valle Tardío en este enjambre no es muy clara, pues al compararlas con 17 muestras colombianas mediante 66 variables evidencia una mayor afinidad con los Muiscas de Bogotá, Herrera y Perijá, aunque se aproxima también al conjunto Caribe. Las menores distancias de Valle Temprano son con Muisca de Bogotá, Muisca de Sogamoso, Valle Tardío, Perijá y Los Santos. Estas muestras están muy afectadas por la deformación craneal, por lo que las dimensiones de la bóveda craneal introducen un sesgo estadístico para este componente.

5.4. Siberia-Circunártico-Circunantártico

Compuesto básicamente por grupos siberianos antiguos (Baikal, Serov, Okunev), circunárticos contemporá-

neos (Buriat, Yakut, Chukchi, Esquimal, Aleut), circunantárticos tardíos (Paraná, Fueguino y de la Gran Costa NW de Estados Unidos del grupo lingüístico Na-Dene (Haida, Tlingit, Atapasco). La relación de dos regiones tan distantes pero de ecosistemas similares estaría evidenciando la convergencia adaptativa de ambos grupos. La inclusión de la muestra Herrera no es muy clara pues el análisis intergrupar de 17 muestras colombianas mediante 66 variables apunta a su afinidad andina, observando las menores distancias con Muisca de Sogamoso Valle Tardío y Valle Temprano. Posiblemente el pequeño tamaño de la muestra genere estos sesgos estadísticos.

5.5. Enjambre Australia-Melanesia-Zhoukoudian

Los grupos de Australia y Melanesia se destacan por poseer la nariz más ancha y aplanada en el ámbito mundial, además de prognatismo y macrodoncia (Milicerowa, 1955). La dolico-hipsicefalia que comparte con los paleoamericanos es lo que ha dado pie para afirmaciones sobre su supuesto origen común, desde la época de Verneau (1924) y Rochereau (1938) hasta las publicaciones del brasileño W. Neves, el argentino H. M. Pucciarelli y el norteamericano J. Powell (Neves *et al.*, 1991, 1999, 2007; Powell, Neves, 1999). Por su parte Zhoukoudian (individuo 101) (Alexeev, 1978) del Paleolítico Superior de la cueva del mismo nombre en China, se aglomera a estos últimos, aunque con todos los grupos observa distancias muy grandes.

En conjunto, según el análisis canónico discriminante los grandes grupos temporo-espaciales se integran por un lado por Siberia, Norte-Centro-Suramérica y Paleoamericanos; por otro lado se ubican Australia, Melanesia y Polinesia; los otros grupos como Caribe y Zhoukoudian están muy separados, especialmente este último. La posición de Caribe podría estar reflejando un proceso de poblamiento muy tardío y en un contexto relativamente aislado (Figura 4).

Las variables útiles para la diferenciación espacial de los grupos masculinos son las de la bóveda craneal (especialmente las longitudes y anchura máxima), la nariz (ángulo, altura, anchura) y el rostro (anchura, ángulos cigomaxilar y nasomalar). Los grupos Andes Septentrionales, Orinoquia y Andes Centrales están muy próximos entre sí; el Caribe es más próximo a los Andes Centrales; Norteamérica a Orinoquia y Circunártico; Patagonia a Australia-Melanesia; los Valles Interandinos al Caribe. Australia-Melanesia constituyen un grupo muy separado del conjunto América-Siberia, evidenciando no solamente una diferenciación espacial sino también ancestral (Figura 5; Tablas 7, 8).

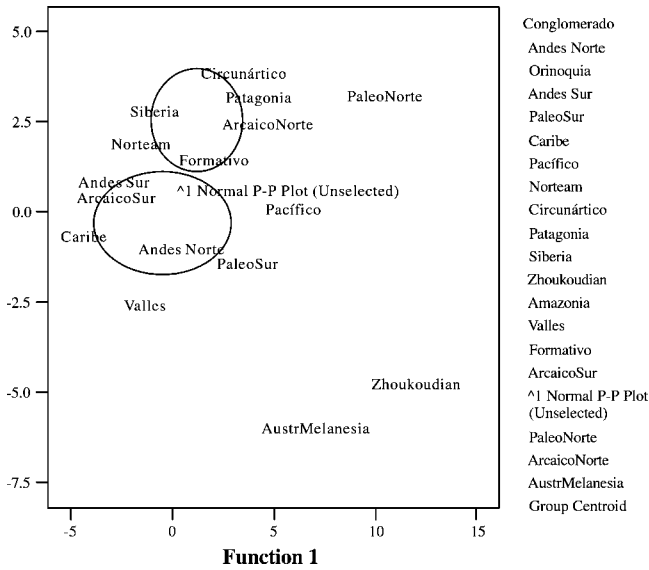


Figura 4. Distribución de los grupos mundiales masculinos según las funciones canónicas discriminantes.

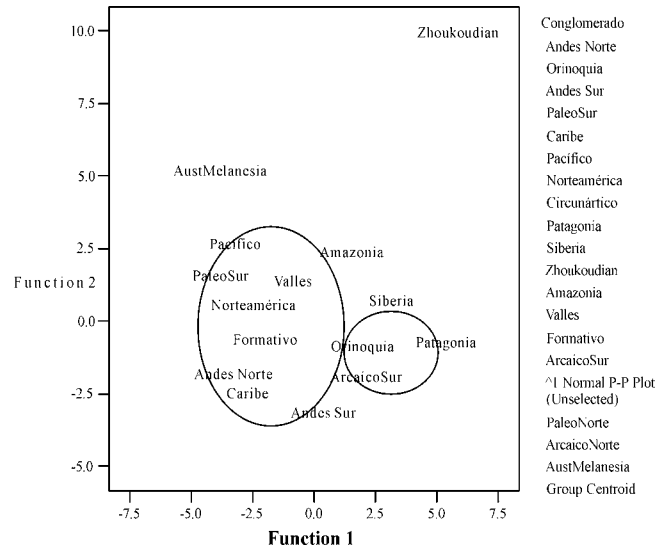


Figura 5. Distribución de los grupos mundiales femeninos según las funciones canónicas discriminantes.

Tabla 7. Matriz de componentes principales para grupos masculinos

	Componente				
	1	2	3	4	5
Long. nasiobasion	,798	-,426	,101	,161	
Altura nasion alveolar	,790		,404		,164
altura nasal	,784	,194	,224	-,244	,254
Long basioprosthion	,742	-,301	-,197	,186	,237
D. a-p máx.	,733	-,524			
Angulo simótico	-,706			,426	,132
Anchura nasal	,687	,111	-,516	,112	
Anchura orbitaria (mf)	,623	,299	-,451	,217	-,178
D. transverso máx		,892		,159	
Anchura bicigomática	,453	,635		,228	-,165
Anch frontal mín	,477	,517	-,440		
Alt basibregmática	,387	-,394	,345		
Angulo nasofacial	,243	,389	,547	-,235	-,508
Angulo nasomalar			,254	,806	,334
Angulo cigomaxilar		,101	,532	,623	-,305
altura orbitaria		,549	,389	-,251	,573

Con el propósito de verificar el papel de la variable tiempo y abordar la problemática de la continuidad o discontinuidad entre unos grupos y otros, se adelantó un análisis discriminante con el fin de construir un modelo de pertenencia de grupo basado en todas las características craneales. El

57,9% de todos los casos fueron agrupados correctamente. Según la tabla de distancias Mahalanobis por pares de grupos, el Paleolítico se aproxima más al Arcaico, y el Formativo al Tardío; el Contemporáneo se acerca más al Paleolítico y al Paleolítico. Las dos primeras funciones son significativas

Tabla 8. Lambda de Wilks para las funciones discriminantes (variable conglomerado)

Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	df	Sig.
1 through 3	,019	220,791	54	,000
2 through 3	,143	108,923	34	,000
3	,573	31,168	16	,013

con un valor en lambda de Wilks menor a 0,005. Incluye en primer orden las dimensiones nasales, orbitales, las longitudes de la base del cráneo y del esqueleto facial, la anchura frontal mínima; igualmente los ángulos, especialmente el simótico (Tablas 9, 10).

Como se puede apreciar, no existe una interrupción entre las poblaciones masculinas del Paleoindio y las siguientes en sentido cronológico, las del Arcaico, y entre estas últimas y las posteriores, señalando continuidad microevolutiva. Tanto los análisis de conglomerados jerárquicos como los discriminantes no apoyan la hipótesis de interrupción evolutiva entre los paleoamericanos y los indígenas contemporáneos. Desde el punto de vista metodológico para la evaluación temporal, pone énfasis en el valor discriminante de las dimensiones nasales (se reduce la anchura), orbitales (tiende a elevarse), en el ángulo simótico (tiende a elevarse), en la anchura frontal mínima (con tendencia al ensanchamiento por la braquicefalización). Igualmente plantea que algunas poblaciones contemporáneas (Botocudo de Brasil) retuvieron rasgos paleoamericanoides quizás por su aislamiento geográfico.

De esta manera las afinidades entre Centro-Suramérica con Australia-Melanesia se pueden interpretar como convergencia adaptativa a condiciones tropicales secas, y no por compartir un tronco ancestral común reciente como se ha aducido con base en información craneométrica (Powell, Neves, 1999; Neves *et al.*, 2007).

El cuadro producido mediante el análisis de las muestras femeninas es un poco diferente, pues según las funciones discriminantes canónicas, con 4 funciones con significado asintótico menor a 0,005, tanto América, Oceanía como Siberia se integran en un gran conglomerado, quedando por fuera los Paleoamericanos y muy distante Zhoukoudian (Fig. 6). Los Paleoamericanos resultan muy próximos, según las distancias de Mahalanobis a Caribe, Amazonia y Andes Centrales; los grupos Andinos y Orinoquia se aproximan entre sí con la Amazonia y Caribe; Oceanía resultó muy próximo a Andes Septentrionales aunque con un $F=0,893$, es decir, no significativo; Patagonia, Circunártico y Siberia resultaron muy similares.

Tabla 9. Matriz de estructura de las funciones discriminantes (grupos masculinos)

	Funciones		
	1	2	3
D. a-p máx.	,798 *	,226	-,558
Long basioprosthion**	,198 *	,121	-,098
Altura nasal**	,156 *	,030	-,149
Angulo simótico**	-,209	-,225 *	-,006
Long. Nasionbasion**	-,049	,167 *	-,149
Altura orbitaria**	,049	-,071 *	,010
Anchura orbitaria (mf)	,406	-,336	,850 *
Angulo nasofacial	,010	,664	,748 *
D. transversal máx.**	-,069	-,234	,559 *
Anchura bicigomática**	,177	-,039	,426 *
Anch frontal mín.**	,157	,030	,382 *
Alt basibregmática**	-,031	-,021	-,281 *
Anchura nasal**	,199	-,034	,280 *
Angulo nasomalar**	-,096	-,023	-,131 *
Angulo cigomaxilar**	,089	,071	-,109 *
Altura nasion alveolar**	,047	,063	-,068 *

Correlaciones intergrupales combinadas entre variables discriminantes y las funciones canónicas discriminantes estandarizadas. Las variables se han ordenado según el tamaño absoluto de correlación con la función.

* Correlación absoluta mayor entre cada variable y cualquier función discriminante

** Esta variable no se usó en el análisis.

Dentro de las medidas más discriminantes se obtuvieron la longitud nasionbasion, las dimensiones orbitales, las anchuras frontal mínima, bicigomática y transversal máxima, los ángulos faciales y el diámetro anteroposterior máximo.

Mediante el análisis de factores principales se producen 5 componentes que explican el 74,3% del total de la variación. Las medidas de los dos primeros componentes corresponden a las faciales (anchuras, alturas, ángulos) y a la longitud nasionbasion.

Por su parte, el análisis de conglomerados jerárquicos apunta a la división de todos los grupos femeninos en 5 conglomerados (Fig. 8). 1. Siberia, NW Coast de Norteamérica, Patagonia y Circunártico. Aquí incide, por lo visto, tanto la procedencia de un tronco ancestral común como la adaptación a ambientes circunárticos. 2. Paleoamericano. Incluye todas las muestras antiguas de Suramérica, además de la andina peruana Paucarcancha, la cubana precerámica Siboney y la amazónica contemporánea Botocudo. 3. Norteamérica, que se vincula además con los grupos de la Orinoquia. 4. Andes Septentrionales, que incluye además el Valle (Temprano y Tardío), Huila, Old Zuñi (Pueblo del SW de Estados Unidos), Taino y los grupos de los Urales

Tabla 10. Distancias Mahalanobis entre pares de grupos masculinos (38 grados de libertad)

Conglomerado	F	Andes Norte	Orinoquia	Andes Sur	PaleoSur	Caribe	Pacífico	Norteam	Circunártico	Patagonia	Siberia	Zhoukoudian	Amazonia	Valles	Formativo	ArcaicoSur	Centroam	PaleoNorte	ArcaicoNorte	AustrMelanesia
Andes Norte	F	-	2,83	1,27	3,97	2,14	5,15	4,65	4,72	4,27	3,86	15,14	1,20	3,15	1,54	2,04	1,99	8,89	4,26	8,10
	Sig.		0,01	0,27	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,15	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
Orinoquia	F	2,83	-	3,55	3,28	1,58	3,66	4,88	5,18	3,48	4,51	12,53	1,06	3,23	1,63	1,65	1,25	7,30	3,83	8,69
	Sig.	0,01		0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,12	0,12	0,29	0,00	0,00	0,00
Andes Sur	F	1,27	3,55	-	5,11	3,42	6,04	4,02	5,37	5,23	5,07	17,07	1,46	4,78	1,84	1,56	2,54	9,00	4,66	10,53
	Sig.	0,27	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,08	0,15	0,01	0,00	0,00	0,00
PaleoSur	F	3,97	3,28	5,11	-	5,04	1,53	4,15	5,02	2,62	4,54	10,53	0,60	6,97	2,69	1,47	2,58	5,57	1,58	4,26
	Sig.	0,00	0,00	0,00		0,00	0,16	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,83	0,00	0,01	0,18	0,01	0,00	0,14	0,00
Caribe	F	2,14	1,58	3,42	5,04	-	5,38	5,75	5,81	3,49	4,90	15,08	1,53	2,61	2,52	3,06	2,79	9,39	5,28	10,21
	Sig.	0,04	0,14	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Pacífico	F	5,15	3,66	6,04	1,53	5,38	-	3,20	3,60	1,77	3,47	6,81	1,31	6,18	3,64	2,66	3,45	2,57	1,66	4,04
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00		0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,12	0,00
Norteam	F	4,65	4,88	4,02	4,15	5,75	3,20	-	3,61	2,49	3,89	12,53	1,03	7,69	3,46	2,25	3,76	6,34	1,44	9,59
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,02	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,19	0,00
Circunártico	F	4,72	5,18	5,37	5,02	5,81	3,60	3,61	-	1,29	1,23	12,32	1,39	8,92	1,51	2,41	2,48	4,88	2,04	10,75
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,27	0,30	0,00	0,21	0,00	0,16	0,02	0,02	0,00	0,05	0,00
Patagonia	F	4,27	3,48	5,23	2,62	3,49	1,77	2,49	1,29	-	1,83	9,26	0,97	6,53	2,41	2,46	2,65	4,20	1,07	7,54
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,09	0,02	0,27		0,08	0,00	0,49	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,41	0,00
Siberia	F	3,86	4,51	5,07	4,54	4,90	3,47	3,89	1,23	1,83	-	9,85	1,00	6,45	2,28	2,89	3,00	5,94	2,58	9,07
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,08		0,00	0,47	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
Zhoukoudian	F	15,14	12,53	17,07	10,53	15,08	6,81	12,53	12,32	9,26	9,85	-	6,70	14,07	11,80	11,55	11,82	5,73	10,51	6,87
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amazonia	F	1,20	1,06	1,46	0,60	1,53	1,31	1,03	1,39	0,97	1,00	6,70	-	2,16	0,97	0,64	0,87	4,18	0,45	3,53
	Sig.	0,32	0,42	0,18	0,83	0,16	0,26	0,44	0,21	0,49	0,47	0,00		0,04	0,49	0,79	0,58	0,00	0,93	0,00
Valles	F	3,15	3,23	4,78	6,97	2,61	6,18	7,69	8,92	6,53	6,45	14,07	2,16	-	3,96	4,11	4,52	10,31	8,27	8,39
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Formativo	F	1,54	1,63	1,84	2,69	2,52	3,64	3,46	1,51	2,41	2,28	11,80	0,97	3,96	-	0,69	0,19	5,74	2,06	7,39
	Sig.	0,15	0,12	0,08	0,01	0,01	0,00	0,00	0,16	0,02	0,03	0,00	0,49	0,00		0,75	1,00	0,00	0,05	0,00
ArcaicoSur	F	2,04	1,65	1,56	1,47	3,06	2,66	2,25	2,41	2,46	2,89	11,55	0,64	4,11	0,69	-	0,66	5,78	1,41	6,27
	Sig.	0,05	0,12	0,15	0,18	0,00	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,79	0,00	0,75		0,77	0,00	0,20	0,00
Centroam	F	1,99	1,25	2,54	2,58	2,79	3,45	3,76	2,48	2,65	3,00	11,82	0,87	4,52	0,19	0,66	-	6,04	2,13	7,62
	Sig.	0,05	0,29	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,58	0,00	1,00	0,77		0,00	0,04	0,00
PaleoNorte	F	8,89	7,30	9,00	5,57	9,39	2,57	6,34	4,88	4,20	5,94	5,73	4,18	10,31	5,74	5,78	6,04	-	4,47	7,00
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
ArcaicoNorte	F	4,26	3,83	4,66	1,58	5,28	1,66	1,44	2,04	1,07	2,58	10,51	0,45	8,27	2,06	1,41	2,13	4,47	-	7,39
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,12	0,19	0,05	0,41	0,01	0,00	0,93	0,00	0,05	0,20	0,04	0,00		0,00
AustrMelanesia	F	8,10	8,69	10,53	4,26	10,21	4,04	9,59	10,75	7,54	9,07	6,87	3,53	8,39	7,39	6,27	7,62	7,00	7,39	-
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Janti y Mansi, cuya ubicación filogenética ha generado controversias entre el mesomorfismo (protomorfia) o la hibridación mongoloide-caucasoide (Alexeev, Gochman, 1984). 5. Oceanía, que incluye los grupos de Australia, Melanesia, Polinesia y Ainu.

6. Otras evidencias paleoecológicas y paleogenéticas

El paso de Siberia hacia América se pudo haber realizado por la región de Beringia cuando se encontraban comunicadas mediante un puente terrestre durante el máximo glacial,

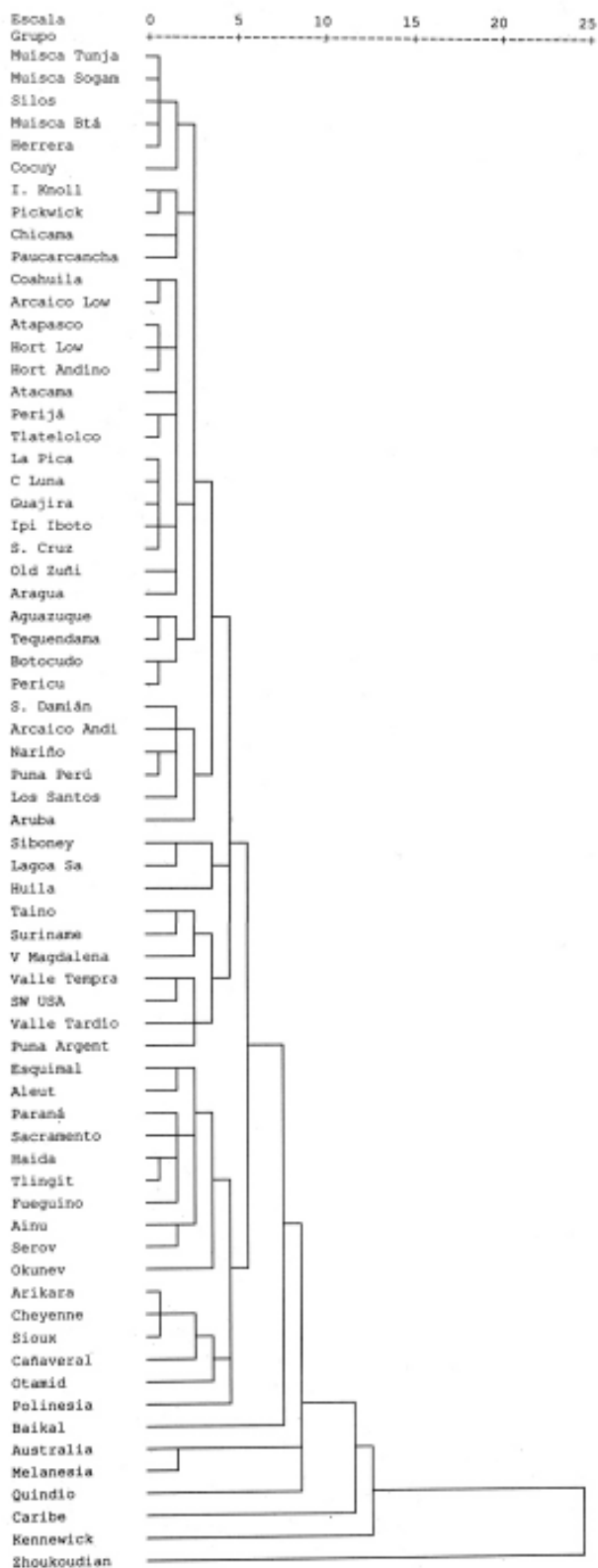


Figura 6. Dendrograma de distancias euclídeas al cuadrado mediante el método Ward. Grupos masculinos mundiales.

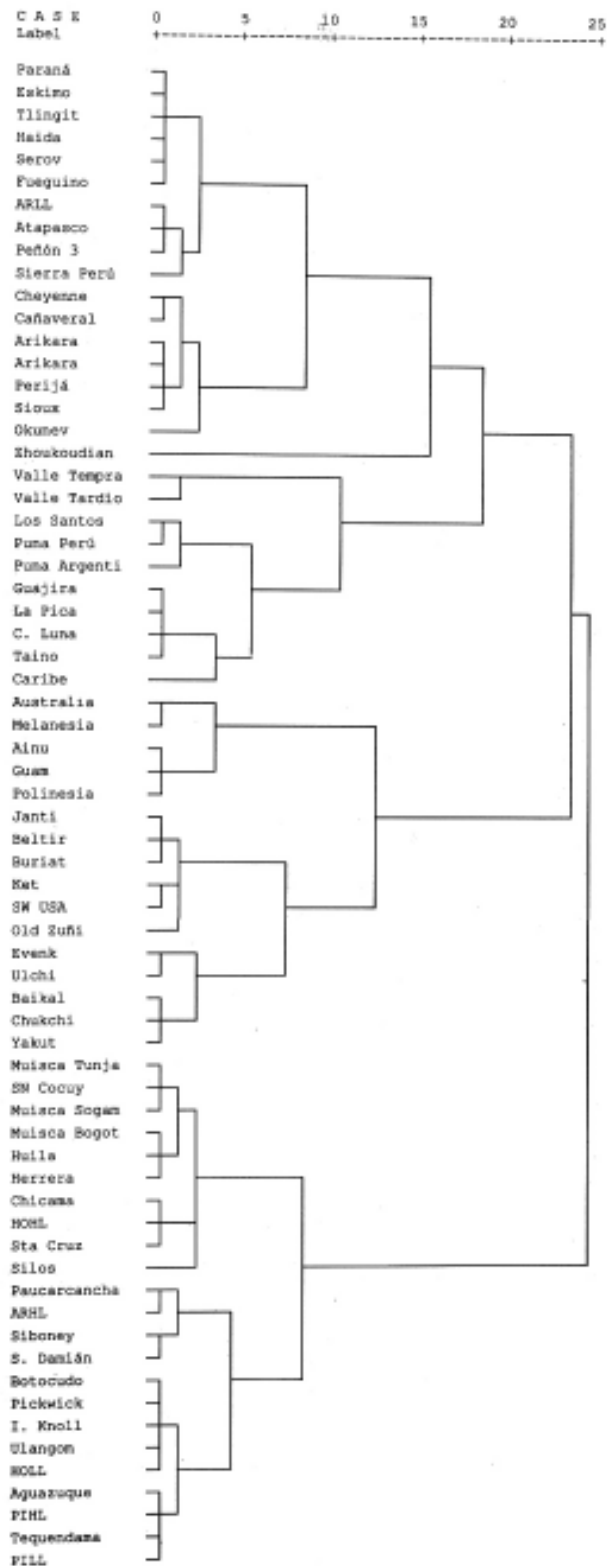


Figura 7. Dendrograma de distancias euclídeas al cuadrado, método de Ward. Grupos femeninos.

Tabla 11. Distancias Mahalanobis entre pares de grupos femeninos (37 grados de libertad)

Conglomerado	F	Andes Norte	Orinoquia	Andes Sur	PaleoSur	Caribe	Pacífico	Norteamérica	Circunártico	Patagonia	Siberia	Zhoukoudian	Amazonia	Valles	Formativo	ArcaicoSur	Centroam	PaleoNorte	ArcaicoNorte	AustMelanesia
Andes Norte	F	2,89	1,46	3,11	3,18	4,30	4,05	5,55	3,77	4,64	12,29	1,76	3,91	1,67	2,23	3,82	2,27	1,85	9,15	
	Sig.	0,01	0,19	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	0,04	0,00	0,03	0,08	0,00	
Orinoquia	F	2,89		2,89	3,97	1,78	3,13	1,48	2,57	2,13	2,70	9,06	1,21	5,78	1,31	1,11	2,63	1,24	2,36	7,78
	Sig.	0,01		0,01	0,00	0,10	0,01	0,19	0,02	0,05	0,01	0,00	0,32	0,00	0,26	0,38	0,02	0,30	0,03	0,00
Andes Sur	F	1,46	2,89		4,34	1,89	5,14	3,63	5,31	4,58	6,31	14,38	1,79	5,39	1,63	1,56	3,27	2,61	2,42	10,44
	Sig.	0,19	0,01		0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,14	0,16	0,00	0,02	0,03	0,00
PaleoSur	F	3,11	3,97	4,34		4,19	1,58	3,41	6,11	4,32	5,57	9,37	1,17	5,23	2,24	3,12	4,43	2,05	0,78	4,15
	Sig.	0,01	0,00	0,00		0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,04	0,01	0,00	0,06	0,65	0,00
Caribe	F	3,18	1,78	1,89	4,19		2,92	1,99	5,60	5,02	5,34	11,92	2,17	5,10	2,36	2,62	2,70	2,56	3,48	6,03
	Sig.	0,00	0,10	0,08	0,00		0,01	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00
Pacífico	F	4,30	3,13	5,14	1,58	2,92		2,84	6,15	4,57	4,65	8,50	1,41	4,70	2,03	4,31	3,05	2,55	1,56	4,30
	Sig.	0,00	0,01	0,00	0,15	0,01		0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,06	0,00	0,01	0,02	0,16	0,00
Norteamérica	F	4,05	1,48	3,63	3,41	1,99	2,84		4,45	2,77	4,66	9,28	1,13	6,97	1,66	2,40	4,06	1,68	1,85	8,49
	Sig.	0,00	0,19	0,00	0,00	0,06	0,01		0,00	0,01	0,00	0,00	0,37	0,00	0,13	0,03	0,00	0,12	0,09	0,00
Circunártico	F	5,55	2,57	5,31	6,11	5,60	6,15	4,45		1,11	2,41	9,12	1,59	7,74	1,94	1,63	4,28	1,69	2,45	13,87
	Sig.	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,38	0,03	0,00	0,15	0,00	0,07	0,14	0,00	0,12	0,02	0,00
Patagonia	F	3,77	2,13	4,58	4,32	5,02	4,57	2,77	1,11		1,76	6,38	1,94	7,22	2,70	2,31	4,66	0,96	2,15	10,27
	Sig.	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,38		0,10	0,00	0,07	0,00	0,01	0,03	0,00	0,49	0,04	0,00
Siberia	F	4,64	2,70	6,31	5,57	5,34	4,65	4,66	2,41	1,76		8,75	1,37	6,12	2,32	3,21	5,06	1,68	2,53	12,51
	Sig.	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,10		0,00	0,23	0,00	0,03	0,00	0,00	0,12	0,02	0,00
Zhoukoudian	F	12,29	9,06	14,38	9,37	11,92	8,50	9,28	9,12	6,38	8,75		4,26	9,63	8,39	9,90	9,01	6,44	7,12	10,59
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amazonia	F	1,76	1,21	1,79	1,17	2,17	1,41	1,13	1,59	1,94	1,37	4,26		2,04	0,62	1,00	1,43	1,77	0,63	3,27
	Sig.	0,10	0,32	0,10	0,34	0,04	0,21	0,37	0,15	0,07	0,23	0,00		0,06	0,79	0,46	0,20	0,10	0,78	0,00
Valles	F	3,91	5,78	5,39	5,23	5,10	4,70	6,97	7,74	7,22	6,12	9,63	2,04		2,81	5,23	3,62	5,07	3,85	7,12
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06		0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Formativo	F	1,67	1,31	1,63	2,24	2,36	2,03	1,66	1,94	2,70	2,32	8,39	0,62	2,81		1,04	1,40	2,24	0,78	7,11
	Sig.	0,13	0,26	0,14	0,04	0,03	0,06	0,13	0,07	0,01	0,03	0,00	0,79	0,01		0,43	0,22	0,04	0,65	0,00
ArcaicoSur	F	2,23	1,11	1,56	3,12	2,62	4,31	2,40	1,63	2,31	3,21	9,90	1,00	5,23	1,04		2,71	1,41	1,74	8,16
	Sig.	0,04	0,38	0,16	0,01	0,02	0,00	0,03	0,14	0,03	0,00	0,00	0,46	0,00	0,43		0,01	0,22	0,11	0,00
Centroam	F	3,82	2,63	3,27	4,43	2,70	3,05	4,06	4,28	4,66	5,06	9,01	1,43	3,62	1,40	2,71		4,20	2,35	6,26
	Sig.	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,22	0,01		0,00	0,03	0,00
PaleoNorte	F	2,27	1,24	2,61	2,05	2,56	2,55	1,68	1,69	0,96	1,68	6,44	1,77	5,07	2,24	1,41	4,20		1,99	5,31
	Sig.	0,03	0,30	0,02	0,06	0,02	0,02	0,12	0,12	0,49	0,12	0,00	0,10	0,00	0,04	0,22	0,00		0,06	0,00
ArcaicoNorte	F	1,85	2,36	2,42	0,78	3,48	1,56	1,85	2,45	2,15	2,53	7,12	0,63	3,85	0,78	1,74	2,35	1,99		5,77
	Sig.	0,08	0,03	0,03	0,65	0,00	0,16	0,09	0,02	0,04	0,02	0,00	0,78	0,00	0,65	0,11	0,03	0,06		0,00
AustMelanesia	F	9,15	7,78	10,44	4,15	6,03	4,30	8,49	13,87	10,27	12,51	10,59	3,27	7,12	7,11	8,16	6,26	5,31	5,77	
	Sig.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

ocurrido entre 22.000-14.000 años, lo que produjo un descenso de 120 metros en el nivel del mar, permitiendo el paso de humanos (paleoamericanos) y animales (mamut, mastodonte, oso de cara corta, megaterio, rinoceronte, caballo americano, tigre dientes de sable, lobo del Pleistoceno, bisonte antiguo, gliptodonte, eremoterio, camélidos) en ambos sentidos. Las frías e inhóspitas condiciones entre los glaciares Laurentia y Cordillera posiblemente no debieron haber permitido el paso interglacial, por lo que se sugiere que la vía costera fue la más apropiada (Polaco, Arroyo, 2001).

La industria lítica de lo que se ha denominado Arqueolítico (34.000/33.000-9.500 a.C.) (Mirambell, 2001: 47) se caracteriza por un instrumental muy elemental, compuesto por artefactos grandes tallados por percusión directa en materia prima local, con un incipiente tallado bifacial (raspadores, raederas, denticulados, perforadores), y corresponden al utillaje de cazadores, recolectores y pescadores. En el segundo período (Cenolítico Inferior, 9.500-7.000 a.C.) aparecen las puntas de proyectil de piedra foliáceas, con acanaladuras, tipo

Tabla 12. Matriz de estructura de funciones discriminantes (variable de agrupación tiempo)

Variable	Función			
	1	2	3	4
Anchura nasal**	-,481 *	,085	,074	,196
Longitud nasiobasion**	-,414 *	-,269	-,278	,289
Longitud basiprostion**	-,379 *	-,219	-,101	,248
Anchura frontal mínima	-,528	,597 *	,583	,157
Angulo nasofacial**	-,151	,246 *	-,193	,209
Angulo simótico	,432	-,356	,823 *	-,097
Diámetro antero post máx**	-,341	-,232	-,437 *	,279
Diámetro transverso máximo**	,013	,294	,407 *	,235
Anchura orbitaria (mf)**	-,286	,108	,326 *	,234
Angulo nasomalar**	,006	-,218	,297 *	,117
Altura basibregmática**	-,163	-,175	-,292 *	,080
Altura nasal	-,297	,073	-,210	,929 *
Altura orbitaria	,297	,555	-,114	,768 *
Altura nasion alveolar**	-,243	-,006	-,304	,712 *
Anchura bicigomática**	-,217	,245	,127	,401 *
Angulo cigomaxilar**	-,002	-,053	-,002	,076 *

Correlaciones intergrupales combinadas entre variables discriminantes y las funciones canónicas discriminantes estandarizadas. Las variables se han ordenado según el tamaño absoluto de correlación con la función.

* Correlación absoluta mayor entre cada variable y cualquier función discriminante.

** Esta variable no se usó en el análisis.

Folsom y Clovis, evidenciando un énfasis en la caza de animales grandes. Hacia el Cenolítico Superior (7.000-2.500 a.C.) aparecen nuevas formas de artefactos y surge el pulido, lo que permitió el empleo de piedras más resistentes al impacto (hachas, azuelas), haciéndose énfasis en la caza menor y en la recolección de plantas (García, 2001).

En Colombia las excavaciones arqueológicas adelantadas por Gonzalo Correal U. en diferentes sitios (Correal *et al.*, 1977; Correal, van der Hammen, 1977; Correal, 1981, 1990) evidencian fechas cercanas a los 10.000 años de antigüedad, y, posiblemente de cerca de 17.000 años para las primeras ocupaciones humanas (Correal, van der Hammen, 2001).

Los estudios genéticos evidencian mayor heterogeneidad en las poblaciones indígenas de Suramérica. Según los análisis de ADN mitocondrial que se transmite por línea materna evidencian que existen cuatro líneas fundadoras (haplogrupos A, B, C, D), y que todos los amerindios descienden de ellas. Tanto las ramas amerindias como siberianas nativas de los haplogrupos A y C no comparten haplotipos derivados, apoyando la hipótesis de que solamente las líneas fundadoras entraron de Siberia hacia América, divergiendo posteriormente mediante la acumulación de nuevas mutaciones (Starikovskaya *et al.*, 1994;

1481; Cann, 1994: 10). El haplogrupo D se encuentra tanto en Siberia como en América, y predomina en la Amazonia. El haplogrupo B no se halla en Siberia y en Norteamérica no se aprecia por encima del paralelo 55° N.

Se ha discutido sobre el papel del haplogrupo B pues se ha planteado que la primera oleada de inmigrantes asiáticos eran portadores de haplogrupos A, C y D, mientras que la segunda del haplogrupo B. Sin embargo, este último se ha hallado en Patagonia con una antigüedad de 8.000 años (Moraga *et al.*, 1999), y es predominante en los Andes Orientales de Colombia, tanto en muestras precerámicas, del Formativo como en las tardías (Fernández, 1999). En algunas muestras como Madrid, Cundinamarca, con fecha 150 a.C. es el único, como si correspondieran al mismo linaje.

Por su parte, el análisis del cromosoma Y indica que la gran mayoría de varones indígenas, al menos un 90% en Suramérica y entre 50-70% en Norteamérica, desciende de una sola línea paterna Q3, y ésta a su vez de la línea siberiana Q, en contraste con las 4 líneas maternas (A, B, C, D). Es decir, que tanto los grupos Amerindios, Na-Dene como Aleutiano-Esquimales descienden de una misma línea paterna Paleoamericana (Santos *et al.*, 1999; Tarazona *et al.*, 2002; Santos, 2004).

Es decir, que genéticamente se estaría corroborando el planteamiento sobre una mayor profundidad temporal en el poblamiento de Centro-Suramérica (incluido el sur de Estados Unidos), cuyos primeros pobladores habrían atravesado la región de Beringia por la costa sin extenderse por Norteamérica (por el territorio desprovisto de casquete glacial), y que posiblemente el haplogrupo B sería el predominante en los primeros paleoamericanos.

Desde la perspectiva lingüística se ha propuesto la existencia de tres grandes grupos lingüísticos que corresponderían a tres oleadas migratorias principales: Amerindia, Na-Dene y Aleutiano-Esquimal, con mayor a menor antigüedad (Greenberg *et al.*, 1986). Suramérica se caracteriza por la mayor diversidad lingüística, y la familia Chibcha con tres grupos chibchenses (vótico, ístmico, magdalénico) con una amplia extensión y heterogeneidad (andinos, selváticos, valles interandinos, Sierra Nevada de Santa Marta) desde Centroamérica hasta Suramérica, y con una gran antigüedad, remontándose la dispersión del protochibchense hacia los milenios IV-III a.C. (Constela, 1995).

7. Conclusiones

En síntesis, los primeros pobladores del Nuevo Mundo fueron los paleoamericanos, con características físicas

similares a las muestras de Tequendama, Checua, Floresta y Aguazuque de Colombia (más cercanas a las poblaciones del Pacífico que a Australia-Melanesia), que traspasaron la región de Beringia provenientes de la región Pribaikal (cerca del lago Baikal, Siberia), siguiendo la ruta costera, extendiéndose hacia el sur desde la región desprovista de casquete glacial en Norteamérica. Eran portadores de haplogrupos B por línea mitocondrial en forma predominante, y de la línea cromosómica Y tipo Q3. En Colombia serían portadores de una lengua protochibcha y del tipo sanguíneo O positivo en su gran mayoría, habiéndose extendido por gran parte del territorio, dando origen a la diversidad andina, caribeña, sabanera (Orinoquia) y valles interandinos. Las poblaciones andinas, además de ser de las más antiguas, desarrollaron respuestas adaptativas a la hipoxia de altura. Los grupos caribeños comparten rasgos comunes con los de las Antillas. Los sabaneros de Colombia y Venezuela igualmente se adaptaron de manera milenaria a ambientes secos con altas temperaturas, al igual que los indígenas del suroeste de Estados Unidos.

Las migraciones desde Siberia, al parecer por tres oleadas en distintos períodos (Centro-Suramericana, Costa Noroeste de Estados Unidos o Na-Dene y Aleut-esquimal), la reestructuración genética por la adaptación a distintos ecosistemas (entre otras la convergencia adaptativa a ambientes circunárticos de la GNWC o Na-Dene y Patagonia), la deriva genética de pequeñas poblaciones aisladas (como podría ser el caso del grupo Guane), el aislamiento con retención de rasgos arcaicos (Pericú de Baja California y Botocudo de la Amazonia), y los desplazamientos migracionales muy tardíos por los valles internadinos de Colombia (posiblemente Karib), constituyeron los principales mecanismos evolutivos que moldearon la estructura genética de las poblaciones amerindias. Finalmente, el efecto de cuello de botella por el impacto de las enfermedades y la conquista europeas debieron modificar la estructura ancestral amerindia.

Desde la perspectiva metodológica se aprecia el alto valor discriminante tanto a nivel intragrupal (sexual) como intergrupala de las dimensiones transversales (anchuras), especialmente faciales (fmo, fmt, bicigomática, cigomaxilar, orbital, nasal), como también de la bóveda craneal no afectadas por la deformación cefálica intencional (frontal mínima, biauricular). En cuanto a longitudes las de la base de la bóveda craneal (nasiobasion) y esqueleto facial (basioprosthion) son las más apropiadas. Los ángulos faciales (nasomalar y cigomaxilar) y nasales (nasofacial, simótico) tienen valor intergrupala, especialmente en la diferenciación de mongoloides (de rostro aplanado) y

australoides (rostro prógnato y más perfilado, con la nariz muy aplanada y corta).

En síntesis, se descartan las hipótesis sobre el origen australo-melanesio de los paleoamericanos, la ausencia de reestructuración genética y de microevolución en los orígenes de la diversidad poblacional de los indígenas americanos.

Bibliografía

- Aguado P.** /1581/1956. *Recopilación historial*. Bogotá, Biblioteca de la Presidencia de la República. 4 vol.
- Alexeev V. P.** 1974. Materiales craneológicos de Nueva Guinea e islas del archipiélago Malayo. *Museo de Antropología y Etnografía* 30: 187-236.
- . 1978. *Paleoanthropology of World and the formation of Human Races*. Moscow, Nauka (en ruso).
- . 1982. Algunas particularidades morfológicas de la población aborigen de América, importantes para la reconstrucción de su proceso de poblamiento. Moscú, Simposio *Los indígenas americanos en el pasado y en el presente*, noviembre 18-19 (en ruso).
- , I Gochman. 1984. *Physical Anthropology of Soviet Asia*. Moscow, Nauka (en ruso).
- Ángel J. L.** 1966. *Early skeletons from Tranquility, California*. Washington, Smithsonian Contribution to Anthropology, vol. 2, No. 1.
- Ardila G. I.** 1984. *Chía. Un sitio precerámico en la Sabana de Bogotá*. Bogotá, FIAN Banco de la República.
- Begley S. & A. Murr.** The First Americans. *Newsweek*, abril 26, pp. 50-57.
- Broca P.** 1875. Sur deux séries des cranes provenant d'anciennes sépultures indiennes des environs de Bogotá. Nancy, *Congr. Inter. D'American*. 1: 367-382.
- Buikstra J. E. & S. R. Frankenberg.** 1990. Skeletal Biological Distance Studies in American Physical Anthropology: Recent Studies. *Amer. J. Physical Anthropol.* 82: 1-7.
- Castellanos J. de.** /1601/1997. *Elegías de varones ilustres de Indias*. Bogotá, Gerardo Rivas M. ed.
- Chatters J. C.** 2000. The Recovery and First Analysis of an Early Holocene Human Skeleton from Kennewick, Washington. *American Antiquity* 65(2): 291-316.
- Cocilovo J. A. & R. A. Guidón.** 2000. La variación geográfica y el proceso de microdiferenciación de las poblaciones aborígenes de Patagonia Austral y de Tierra del Fuego. *Revista Chilena de Antropología* 15: 9-20.
- , **H. M. Varela, O. Espoueuys & V. G. Standen.** 2001. El proceso microevolutivo de la población nativa antigua de Arica. *Chungará Revista de Antropología Chilena* 33: 13-20.
- Constela A.** 1995. Sobre el estudio diacrónico de las lenguas chibchenses y su contribución al conocimiento del pasado de

- sus hablantes. Bogotá, *Boletín del Museo del Oro*, Banco de la República 38-39: 13-55.
- Correal G.** 1974. Las Acacias. Un cementerio Muisca en la Sabana de Bogotá. Características culturales y aspectos de Antropología Física. Bogotá, *Ethnia* 4: 3-16.
- . 1979. *Investigaciones arqueológicas en los abrigos rocosos de Nemocón y Sueva*. Bogotá, FIAN Banco de la República.
- . 1985. Concepto antropométrico y etnográfico sobre los restos hallados en Cueva de la Trementina, Departamento del Cesar. Bogotá, *Maguaré* Dpto. Antropología Univ. Nal. Col. 3: 89-109.
- . 1987. Excavaciones arqueológicas en Mosquera. Bogotá, *Revista estudiantes de Arqueología* 3: 13-17.
- . 1990. *Aguazuque: evidencia de cazadores, recolectores y plantadores en la altiplanicie de la cordillera Oriental*. Bogotá, FIAN Banco de la República.
- & **T. Van Der Hammen.** 1977. *Investigaciones arqueológicas en los abrigos rocosos del Tequendama*. Bogotá, Biblioteca Banco Popular.
- Debetz G. F.** 1951. *Investigaciones antropológicas en la península de Kamchatka*. Moscú, Nauta (en ruso).
- Fernández C.** 1999. *La arqueología molecular aplicada a la solución de problemas prehistóricos: análisis de ADN mitocondrial en momias y restos óseos prehispánicos*. Bogotá, Tesis de Grado, Carrera de Antropología, Universidad Nacional de Colombia.
- Fleury C. E.** 1953. Guajira. Estudio craneométrico. Notas preliminares para el estudio arqueológico. Caracas, *Rev. Anales Univ. Central de Venezuela* 34: 137-206.
- . 1953. Estudio antropométrico de la colección de cráneos motilonos (Sierra de Perijá). Caracas, *Memorias Soc. Ciencias Naturales La Salle* 34: 9-56.
- Freeman S. & J. C. Herron.** 1998. *Evolutionary Analysis*. New Jersey, Prentice Hall.
- Galarza M. E.** 1981. *La deformación craneal artificial en Colombia*. Bogotá, Trabajo de Grado, Carrera de Antropología Universidad Nacional de Colombia.
- García J.** 2001. Cenolítico Superior y Protoneolítico (7000-2500 a.C.). México, *Arqueología Mexicana* 9(52): 52-57.
- Genovés S.** 1970. Anthropometry of late Prehistoric Human Remains. Austin, *Handbook of Middle American Indians*. Univ. Texas Press, 9: 35-45.
- González R., S. L. Dahinten, M. A. Luis, M. Hernández & H. M. Pucciarelli.** 2001. Craniometric Variation and the Settlement of the Ameritas: Testing Hypothesis by Means of R-Matrix and Matrix Correlation Analyses. *Am. J. Physical Anthrop.* 116: 154-165.
- , **A. González, M. Hernández, H. M. Pucciarelli, M. Sardi, A. Rosales & S. Van Der Molen.** 2003. Craniometric evidence for Palaeoamerican survival in Baja California. *Nature* 425: 62-65.
- Greenberg J. H., Turner C. G. & S. L. Zegura.** 1986. The settlement of the Americas: a comparison of the linguistic, dental and genetic evidence. *Current Anthropol.* 27: 477-495.
- Groot A. M.** 1992. *Checua. Una secuencia cultural entre 8500 y 3000 años antes del presente*. Bogotá, FIAN Banco de la República.
- Grühn R.** 1989. The Pacific Coast Route of Initial Entry: An Overview. Paper present at the *First World Summit Conference on the Peopling of the Americas*. Center for the Study of the First Americans. Orono, Maine, May.
- Guinzburg V. V.** 1967. Caracterización antropológica de la población antigua de Cuba. Cultura y costumbres de los pueblos de América. St. Petersburg, *Museo de Antropología y Etnografía*, t. 24.
- Hanihara T.** 1996. Comparison of Craniofacial Features of Major Human Groups. *Amer. J. Physical Anthrop.* 99: 389-412.
- Howells W. W.** 1973. *Cranial Variation in Man. A Study by Multivariate Analysis of Patterns of Difference Among Recent Human Population*. Cambridge, Mass. Papers of the Peabody Mus. Arch. Ethn. Vol. 67.
- . 1989. *Skull Shapes and the Map. Craniometric Analysis in the Dispersion of Modern Homo*. Cambridge, Mass. Peabody Mus. Arch. Ethn. Vol. 79.
- Hrdlicka A.** 1931. Catalogue of Human Crania in the United States National Museum Collection. Pueblos, southern Utah, Basket Makers, Navaho. Washington, *Proc. US Nat. Museum* 78(2): 1-95.
- . 1941. Catalogue of Human Crania in the United States National Museum Collection. Indians of the Gulf States. Washington, *Proc. US Nat. Museum* vol. 87, No. 3076.
- . 1944. Catalogue of Human Crania in the United States National Museum Collection. Non-Eskimo people of the Northwest coast, Alaska and Siberia. Washington, *Proc. US Nat. Museum* vol. 94, No. 3171.
- Kozintsev A. G., A. V. Gromov & V. G. Moiseyev.** 1999. Collateral Relatives of American Indians Among the Bronze Age Populations of Siberia? *Amer. J. Phys. Anthrop.* 109(2): 193-204.
- Lagrange De C. H.** 1982. Craneología indígena de Venezuela. México, *Estudios de Antropología Física* 1: 263-293.
- Lalueza C., A. González & S. Vives.** 1996. Craneal Variation in the Iberian Peninsula and the Balearic Islands: Inferences About the History of the Population. *Amer. J. Physical Anthrop.* 99: 413-428.
- Lleras R.** 1995. Diferentes oleadas de poblamiento en la prehistoria tardía de los Andes Orientales. Bogotá, *Boletín del Museo del Oro* Banco de la República 38-39: 3-11.
- Milicerowa H.** 1955. *Crania Australica*. Wroclaw, Materia i Prace Antropologizsne, No. 6.
- Mirambell L.** 2001. Arqueolítico y Cenolítico Inferior (30000-7000 a.C.). México, *Arqueología Mexicana* 9(52): 46-51.
- Moraga M., O. Reyes, F. Mena & P. Carvallo.** 1999. Análisis de DNA en esqueletos humanos del Arcaico Temprano y fauna

- asociada, excavados en la estepa Patagónica. Jujuy, Universidad Nacional de Jujuy, *Cuartas Jornadas Nacionales de Antropología Biológica*, 26-29 de octubre, p. 66.
- Neumann G.** 1952. Archaeology and Race in the American Indian. *Yearbook of Physical Anthropology* 8:213-237.
- Neves W. A., D. Munford, M. C. Zanini & H. M. Pucciarelli.** 1999. Cranial morphological variation in South America and the colonization of the New World: Towards a four migration model? *Ciencia e Cultura J. Brazilian Assoc. Advancement of Science* 51(3/4): 151-165.
- Neves W. A. & H. M. Pucciarelli.** 1991. Morphological affinities of the first Americans: an exploratory analysis based on early South American human remains. *J. Human Evolution* 21: 261-273.
- Neves W. A., M. Hubbe & G. Correal.** 2007. Human skeletal remains from Sabana de Bogotá, Colombia: A case of Paleoamerican morphology late survival in South America? *Am. J. Phys. Anthropol.*
- Newman M. T.** 1943. A metric study of undeformed Indian cranial from Peru. *Amer. J. Physical Anthropol.* 1(1): 21-45.
- _____, **C. E. Snow.** 1942. Preliminary report on the skeletal material from Pickwick Basin, Alabama. Washington, *Institution Bureau of American Ethnology*, Bulletin 129: 393-536.
- Newman R. W.** 1957. A Comparative Analysis of Prehistoric Skeletal Remains from the Lower Sacramento Valley. Washington.
- Pérez P. F.** 2001. Procesos de interacción en el área septentrional del altiplano Cundiboyacense y oriente de Santander. En: *Los chibchas. Adaptación y diversidad en los Andes Orientales de Colombia*, J. V. Rodríguez ed. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Colciencias, pp. 49-109.
- Pérez de Barradas J.** 1951. *Los Muiscas antes de la Conquista*. Madrid, Inst. Bernardino de Sahagún, vol. 1.
- Pérez de Barradas J.** 1955. *Les Indiens de l'Eldorado. Etude historique et ethnographique des Muiscas de Colombia*. Paris.
- Pietrusewsky M.** 2000. Metric Analysis of Skeletal Remains: Methods and Applications. In: *Biological Anthropology of the Human Skeleton*. A. A. Katzenberg, S. R. Saunders eds. New York, Wiley-Liss, pp. 375-415.
- Polaco O. J. & J. Arroyo.** 2001. El ambiente durante el poblamiento de América. México, *Arqueología Mexicana* 9(52): 30-35.
- Pompa y Padilla J. A. & E. Serrano.** 2001. Los más antiguos americanos. México, *Arqueología Mexicana* 9(52): 36-41.
- Powell J. F.** 1993. Dental Evidence for the Peopling of the New World: Some Methodological Consideration. *Human Biology* 65(5): 799-819.
- Powell J. F. & W. A. Neves.** 1999. Craniofacial morphology of the first Americans: pattern and process in the peopling of the New World. *Yearbook Phys. Anthropol.* 42: 153-158.
- Powell J., W. A. Neves, E. Ozolins & H. M. Pucciarelli.** 1999. Afinidades biológicas extra-continentales de los dos esqueletos más antiguos de América: implicaciones para el poblamiento del Nuevo Mundo. México, *Antropología Física Latinoamericana* 2: 7-22.
- Relethford J. H.** 1994. Craniometric Variation among Human Populations. *Amer. J. Physical Anthropol.* 95: 53-62.
- Rochereau H. J.** 1938. Contribución a la antropología colombiana. El origen de los indios tunebos. Bogotá, *Revista Acad. Col. Ciencias Exactas Fís. Nat.* 2(6): 279-282.
- Rodríguez C.** 1999. *Programa de monitoreo y rescate arqueológico sitio Lorenzo Bajo, Duitama*. Bogotá, Gasoducto ramales a Boyacá y Santander, Consorcio Montecz Conequijos S. A.
- Rodríguez J. V.** 1987. Algunos aspectos metodológicos bioantropológicos relacionados con el poblamiento de América. Bogotá, *Maguaré* Dpto. Antropología Univ. Nal. Col. 5: 9-40.
- _____. 1992. Características físicas de la población prehispanica de la cordillera Oriental: implicaciones etnogenéticas. Bogotá, *Maguaré*, Dpto. Antropología Univ. Nal. Col. 8: 7-47.
- _____. 1994. *Introducción a la Antropología Forense*. Bogotá, Ed. Anaconda.
- _____. 2001. Craneometría de la población prehispanica de los Andes Orientales de Colombia: diversidad, adaptación y etnogenesis. Implicaciones para el poblamiento americano. En: *Los chibchas. Adaptación y diversidad en los Andes Orientales de Colombia*, J. V. Rodríguez ed. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Colciencias, pp. 250-310.
- _____. 2003. *Dientes y diversidad humana. Avances de la Antropología Dental*. Bogotá, Guadalupe ed.
- _____. 2004. *La Antropología Forense en la identificación humana*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- _____. 2005. *Pueblos, rituales y condiciones de vida prehispanicas en el Valle del Cauca*. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.
- _____, **A. Cifuentes.** 2005. Un yacimiento formativo ritual en el entorno de la antigua laguna de La Herrera, Madrid, Cundinamarca. Bogotá, *Maguaré*, Dpto. Antropología Univ. Nal. Col. 19: 103-131.
- Romano A.** 1970. Pre-ceramic Human Remains. Austin, *Handbook of Middle American Indians*. Univ. Texas Press, 9: 22-34.
- Rothhammer F., J. A. Cocilovo & S. Quevedo.** 1984. El poblamiento temprano de Sudamérica. *Revista Chungará*, Univ. Tarapacá, Arica, Chile 13: 99-108.
- Rothhammer F. & C. Silva.** 1990. Craniometrical Variation among South American Prehistoric Populations: Climatic, Altitudinal, Chronological, and Geographic Contributions. *Amer. J. Physical Anthropol.* 82: 9-17.
- Sacchetti A.** 1988. Craneometría arcaica de Colombia en la dinámica taxológica sudamericana. *Revista Española de Antropología Americana* 18: 159-224.
- Santos F. R.** 2004. *The Pre-Columbian Peopling of America: by the Y Chromosome*. Caracas, Universidad Central de Venezuela, Congreso Latinoamericano de Antropología Biológica (ALAB).
- Santos F. R., A. Pandya, C. Tyler-smith, S. D. Pena, M. Schanfield, W. R. Leonard, L. Osipova, M. H. Crawford & R. J. Mitchel.** 1999. The Central Siberian origin for native American Y chromosomes. *Am. J. Hum. Genet.* 64: 619-628.

- Schiulli P. W.** 1990. Cranial Metric and Discrete Trait Variation and Biological Differentiation in the Terminal Late Archaic of Ohio: The Duff Site Cemetery. *Amer. J. Physical Anthropol.* 82: 19-29.
- Schottelius J W.** 1946. Arqueología de la Mesa de Los Santos. Bogotá, *Boletín Arqueológico* 2: 213-225.
- Segura L. & E. Quiñones.** 1998. Apuntes al conocimiento bioantropológico de la población prehispánica del Cercado Grande de los Santuarios. Bogotá, *Maguaré* Dpto. Antropología Univ. Nal. Col. 13: 165-178
- Shennan S.** 1992. *Arqueología cuantitativa*. Barcelona, Editorial Crítica.
- Silva E.** 1945. Sobre Antropología Chibcha. Bogotá, *Boletín Arqueológico* 1(6): 531-552.
- . 1946. Cráneos de Chiscas. Bogotá, *Boletín Arqueológico* 2(2): 46-60.
- . 1947. Sobre Arqueología y Antropología Chibcha. Bogotá, *Revista Universidad Nacional* 8: 233-253.
- SPSS.** 2002. *Base 12 Applications Guide*. Chicago, SPSS Inc.
- Simón P.** /1626/ 1981. *Noticias históricas de las conquistas de Tierra Firme en las Indias Occidentales*. Bogotá, Biblioteca Banco Popular.
- Snow C. E.** 1948. *Indian Knoll Skulls*. Washington.
- Sokal R. R. & H. Uytterschaut.** 1987. A Classification of European Skulls from three Time Periods. *Amer. J. Physical Anthropol.* 74: 1-20.
- . 1987. Cranial Variation in European Populations: A Spatial Autocorrelation Study at Three Time Periods. *Amer. J. Physical Anthropol.* 74: 21-38.
- Starikovskaya Y. B., R. I. Sukernik, T. G. Schurr, A. M. Kogelnik & D. C. Wallace.** 1998. mtDNA Diversity in Chukchi and Siberian Eskimos: Implications for the Genetic History of Ancient Beringia and the Peopling of the New World. *Am. J. Hum. Genet.* 63: 1473-1491.
- Tacoma J.** 1963. *American Indians from Suriname. A physical anthropological study*. Utrecht.
- Tacoma J.** 1965. Craniology of Aruban Indians. En: *Homenaje a Juan Comas en su 65 aniversario*. México, Antropología Física vol. 2: 367-76.
- Tarazona-santos E. & F. R. Santos.** 2002. The peopling of the Americas: a second major migration? *Am. J. Hum. Genet.* 70: 1377-1380.
- Verneau R.** 1924. Cranes d'indiens de la Colombia. L'élément Papoua en Amérique. Paris, *L'Anthropologie* 34(5): 354-386.

Recibido: julio 25 de 2007

Aceptado para su publicación: agosto 22 de 2007

ACUMULACIÓN DE Pb, Cd Y Zn EN SEDIMENTOS ASOCIADOS A *RHIZOPHORA MANGLE*, EN EL RÍO SEVILLA, CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA, COLOMBIA

Por

Juan Pablo Parra¹ y Luisa Fernanda Espinosa¹

Resumen

Parra, J. P. & L. F. Espinosa: Acumulación de Pb, Cd y Zn en sedimentos asociados a *rhizophora mangle*, en el río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 347-354, 2007. ISSN 0370-3908.

En sedimento asociado a la especie *Rhizophora mangle* del Río Sevilla- Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), se realizaron dos ensayos de contacto para evaluar la capacidad de adsorber los metales Cd, Pb y Zn y la competencia de estos metales por los sitios de adsorción. Las mediciones se hicieron por espectrometría de emisión atómica de plasma inductivamente acoplado (ICP-AES). La isoterma de Langmuir mostró el siguiente comportamiento de adsorción Pb>>Cd>Zn, lo cual guarda una estrecha relación con lo observado en el sistema natural, donde la mayor concentración de las formas no biodisponibles fue de Pb. Por otra parte, se realizaron ensayos de desorción en función de la salinidad, de los cuales se evidenció una fuerte competencia entre el Zn y el Cd por los sitios de adsorción, y se mostró la influencia de esta variable en la movilidad de los metales en estudio, con un orden de desorción de Cd > Zn >> Pb.

Palabras clave: Adsorción, desorción, isotermas de adsorción, metales pesados, sedimentos de manglar.

Abstract

Two contact assays were carried out in sediment associated to the species *Rhizophora mangle* of the Seville River- Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), in order to evaluate their capacity of adsorption Cd, Pb and Zn, and the competition of these three metals for the adsorption places. The measurements were made by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES). The Langmuir isotherm showed the following adsorption behavior Pb>>Cd>Zn, which was narrowly

¹ Dirección Postal: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR, Cerro de Punta Betín, Santa Marta, Colombia. A.A. 1016. Correo electrónico: juanpablo@invemar.org.co, lespinosa@invemar.org.co.

related with the natural system observations, where the biggest Pb concentration is the non bioavailable form. On the other hand, desorption assays in function of salinity was carried out, these assays evidenced a strong competition by the places of adsorption between the Zn and the Cd, and they showed the influence of this variable in the mobility of the studied metals, with a desorption order of $Cd > Zn >> Pb$.

Key Words: Adsorption, desorption, adsorption isotherms, heavy metals, mangrove sediments.

Introducción

El transporte y movilidad de metales pesados en sedimentos dependen no solamente de su concentración, sino también de la especiación y solubilidad de sus compuestos (Suduan et al., 1997, Yin et al., 1996; McLaren et al., 1998; Wu et al., 1999). La concentración de los iones de metales pesados transferidos de la columna de agua al sedimento está determinada por procesos en los que intervienen la precipitación, la adsorción, la co-precipitación, el intercambio catiónico, la formación de complejos, la actividad microbiana y la absorción por las plantas (McLaren et al., 1998), es por esto que el estudio de los procesos de adsorción/desorción de metales pesados es crucial en la propuesta de estrategias efectivas de mitigación, reducción o eliminación de estos tóxicos en los sistemas naturales.

La retención de metales pesados en sedimentos está determinada por dos procesos dominantes: (i) el metal se adsorbe a la matriz del sedimento como ión fácilmente intercambiable y (ii) el metal se adsorbe con una alta afinidad a sitios específicos en la matriz del sedimento (Seuntjens et al., 2001). El segundo proceso (adsorción específica) hace que el metal este fuertemente enlazado a la fase sólida del sedimento. Este tipo de reacción incluye la formación de complejos internos y externos, precipitación superficial e incorporación de iones del metal pesado en la estructura mineral del sedimento (Seuntjens et al., 2001). Por otro lado, no todos los contaminantes adsorbidos pueden ser desorbidos, es decir la reacción no es totalmente reversible, esto comúnmente se refiere como histéresis de adsorción/desorción, la cual es gobernada por la estabilidad de los complejos superficiales y por el tipo de adsorción ocurrida.

El fenómeno de adsorción generalmente se describe mediante graficas denominadas isotermas de adsorción que representan la cantidad de metal pesado (adsorbato) adsorbido por gramo de sedimento (adsorbente) en función de la concentración en el equilibrio del adsorbato a una temperatura constante (Chantawong et al., 2003). Los modelos de Langmuir y Freundlich son comúnmente uti-

lizados para describir la adsorción y determinar su capacidad máxima. El modelo de Langmuir se basa en consideraciones fundamentales de una superficie homogénea y una adsorción limitada a una monocapa y esta dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bX_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad (1)$$

Donde q_e es la cantidad de metal adsorbida por unidad de masa de adsorbente, C_e es la concentración en solución en equilibrio, X_m es la capacidad de adsorción y b es una constante relacionada con la energía de enlace entre el adsorbente y el adsorbato (Silva, 1998, Houg y Lee, 1998, Chantawong et al., 2003).

La isoterma de adsorción de Freundlich es considerada a menudo como una ecuación de adsorción empírica y puede demostrarse gráficamente desde un número limitado de superficies. Se expresa por la siguiente ecuación:

$$\text{Log}(q) = \text{Log}(k) + \frac{1}{n} \text{Log}(C) \quad (2)$$

Donde k es un factor de capacidad que se relaciona con la capacidad de adsorción y n es un parámetro de linealidad de la isoterma, un indicador de heterogeneidad de los sitios activos (Silva, 1998, Houg y Lee, 1998, Chantawong et al., 2003).

La movilidad de los metales pesados en sedimentos frecuentemente se relaciona a través de un coeficiente de distribución (K_d) que es el cociente entre la concentración del metal adsorbido y la concentración en la solución en equilibrio. K_d representa la afinidad de la adsorción del metal por la fase sólida del suelo, por lo tanto indica la capacidad de un sedimento por retener un contaminante (metales pesados) y que puede llegar a ser removilizado a la fase líquida (Alumaa et al., 2001). Dicho coeficiente resulta de gran utilidad para comparar la capacidad de adsorción de diferentes materiales adsorbentes para un elemento en particular (Piwoni y Keeley, 1990; Alloway, 1995).

El propósito de esta investigación fue evaluar la capacidad de acumulación de Cd, Pb y Zn en el sedimento asociado al bosque de mangle, usando el coeficiente de distribución K_d y los parámetros de las isoterms de adsorción de Langmuir y Freundlich. Además, determinar la reversibilidad de las reacciones de adsorción en función de la salinidad de la solución acuosa que está en contacto con el sedimento, mediante ensayos de desorción. Finalmente, establecer el patrón de adsorción y desorción sobre el sedimento asociado a la planta de *R. mangle* para cada uno de los metales en estudio.

Materiales y métodos

Fase de Campo

En Octubre de 2003 se realizó un muestreo en el ecosistema de manglar del Río Sevilla, ubicado en el sector oriental del complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), departamento del Magdalena. Se ubicaron tres estaciones de muestreo: estación 1, localizada a 115 m al norte y 271 m al oeste de la desembocadura del río; estación 2, a 508 m al norte y 538 m al oeste de la

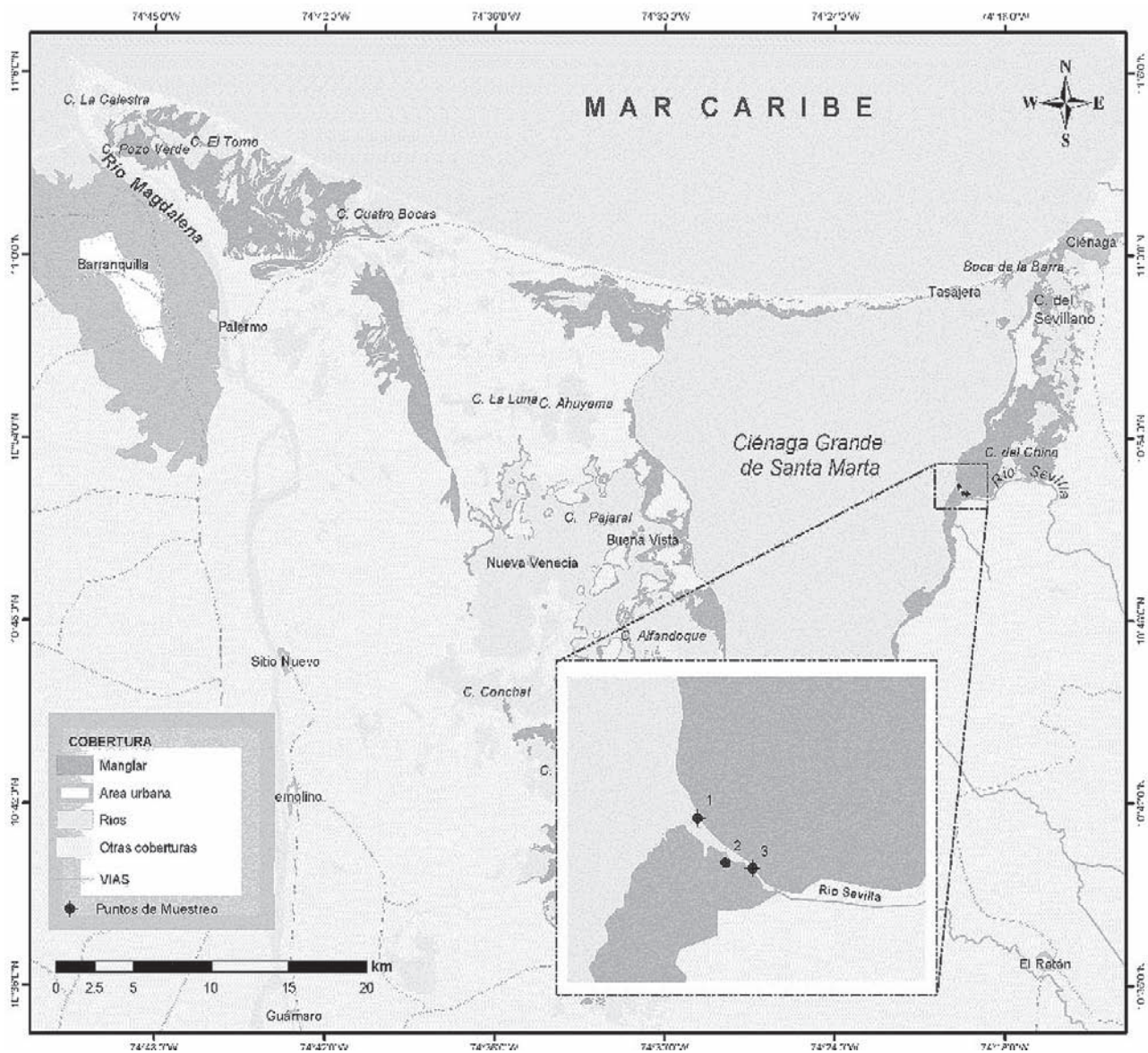


Figura 1. Ubicación de 3 estaciones de muestreo en el Río Sevilla-CGSM.

desembocadura; y estación 3, a 556 m al norte y 790 m al oeste de la desembocadura del Río Sevilla en la CGSM (Figura 1).

En cada estación, a una distancia promedio de 2 m de un árbol de *R. mangle* seleccionado al azar, se colectó sedimento con corazonadores de PVC de 9 cm de diámetro y 100 cm de largo (Parra y Espinosa, sometido). Los testigos se transportaron refrigerados hasta el laboratorio, donde se almacenaron a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el sedimento superficial se midieron las variables fisicoquímicas salinidad, pH y potencial redox (Eh), con equipos portátiles previamente calibrados. Al sedimento superficial de cada testigo ($<5\text{ cm}$), se le determinó la concentración biodisponible y total de Pb, Cd y Zn, el contenido de materia orgánica y el porcentaje de limos y arcillas.

Fase de Laboratorio

Para la determinación granulométrica y el contenido de materia orgánica, el sedimento se secó en estufa a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 48 horas. La submuestra usada para granulometría, se redisolvió en una solución dispersante de hexametáfosfato de sodio $[(\text{NaPO}_3)_6\text{Na}_2\text{O}]$ al 1 %, se tamizó con una malla de $63\text{ }\mu\text{m}$, el filtrado se centrifugó y se secó en estufa a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. El contenido de limos y arcillas se expresó como el porcentaje del cociente entre la masa obtenida a través del tamiz de $63\text{ }\mu\text{m}$ y la masa total (Hall, 1991; Garay et al., 2003). La materia orgánica (MO) se determinó por el método de calcinación a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 4 horas (Garay et al., 2003).

Para determinar la concentración de metales pesados en el sedimento la muestra se liofilizó y se tamizó con una malla plástica de $63\text{ }\mu\text{m}$. La fracción menor a $63\text{ }\mu\text{m}$ se sometió a dos tipos de extracción: (i) *Extracción débil (biodisponible)*: un gramo de muestra seca se trató con 15 mL de HCl 0.1 N, en agitación por 24 horas. El extracto se filtró y se llevó a volumen con el mismo ácido (Wallner-Kersanach, 1997). (ii) *Extracción fuerte*: 0.4 g de muestra seca fueron tratados con 3 mL de $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ (2:1) a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ en bombas cerradas a presión por 3 horas. El extracto se filtró y se llevó a volumen con HCl 0.1 N (Garay et al., 2003). Los metales se determinaron con la técnica analítica de Espectrofotometría de Emisión con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-AES), en un ICP-AES (Spectro Flame Modula). El Pb se determinó en la línea espectral 283.31 nm, el Cd en la línea espectral 228.80 y el Zn en la línea espectral 213.86.

Para el control analítico se evaluaron los siguientes parámetros: *Limite de detección del método (LDM)* me-

dante mediciones sucesivas de 10 blancos de muestra; *error relativo* evaluado a partir de submuestras fortificadas (3.3 % para Cd, 4.5 % para Zn y 5.6 % para Pb); *precisión*, expresada como el porcentaje del coeficiente de variación (%CV), el cual se estimó como la variación obtenida para seis replicas de una misma muestra (2.4% para Cd, 5.1 % para Zn y 5.6 % para Pb).

Para evaluar la adsorción en el sedimento de manglar, se realizaron dos ensayos de contacto. En el primer ensayo, a 0.5 gr de sedimento (seco) se añadieron 10 mL de solución de Zn a concentraciones de 30, 50, 80, 120, 150, 200 y 250 $\mu\text{g/mL}$; Cd a concentraciones de 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.6, 2 $\mu\text{g/mL}$; y Pb a concentraciones de 6, 10, 50, 80, 120, 150, 200 $\mu\text{g/mL}$, preparadas en una solución de $1\times 10^{-3}\text{ M}$ de CaCl_2 para mantener la fuerza iónica constante. En el segundo ensayo se utilizaron las mismas concentraciones de los tres elementos (4, 20, 40, 70, 100, 120, 160, 200 $\mu\text{g/mL}$), con el objetivo de evaluar la posible competencia entre los iones de los metales adicionales. En los dos experimentos se ajustó el pH a 6.5, adicionando pequeñas cantidades de HNO_3 y NaOH diluidos. Las muestras fueron agitadas a temperatura ambiente ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), en un agitador orbital por 24 horas, al cabo de las cuales el sedimento se separó por centrifugación (Yin et al., 1997; Huang y Lee, 1998; Wu et al., 1999; Davranche, 2001; Glover et al., 2002). La concentración adsorbida de cada metal se determinó calculando la diferencia entre la concentración inicial añadida y la concentración final en la solución por gramo de sedimento en peso seco. Finalmente se calcularon las isoterms de Langmuir y Freundlich, mediante las ecuaciones descritas en la introducción.

Las isoterms de desorción se realizaron con el objetivo de determinar la cantidad de metal remanente luego de la adsorción y su comportamiento frente a la salinidad. Se siguió el procedimiento de adsorción previamente descrito, utilizando una solución con Cd 2.0 $\mu\text{g/mL}$, Pb 200 $\mu\text{g/mL}$ y Zn 250 $\mu\text{g/mL}$. Después del tratamiento, el sedimento se secó a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h y se realizó una extracción débil (HCl 0.1 N), para determinar la concentración biodisponible inicial de cada metal. 0.4 gr del sedimento seco, se colocaron en tubos de centrifuga con 10 mL de solución salina (0.5, 10, 15, 25, 35, 45); el pH se ajustó a 6.5. Las muestras fueron agitadas a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, al cabo de las cuales el sedimento se separó por centrifugación. Se determinó la concentración desorbida de cada metal calculando la diferencia entre la concentración inicial en el sedimento y la concentración después del equilibrio en la solución remanente.

Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica del sedimento

En la Tabla 1 se muestran los valores de pH, potencial redox (Eh) y salinidad medidos en el sedimento en cada estación. En las tres estaciones el pH fue levemente ácido, con una tendencia a disminuir al alejarse de la boca de la CGSM. Los cambios de pH son importantes en la movilidad de los metales pesados ya que muchos sitios de adsorción en sedimentos son dependientes del pH, como los óxido-hidróxidos de Fe y Mn, la materia orgánica, carbonatos y la superficie de los minerales de la arcilla.

El Eh mostró un gradiente de condiciones reductoras, con valores entre -375 y -130 mV, desde la boca de la ciénaga hacia aguas arriba (Tabla 1). Estos valores de Eh son producidos por la acción de los microorganismos, durante los procesos de degradación de la materia orgánica, que es un proceso característico de los (Altmann y Bourg, 1997). En estos sistemas, la materia orgánica actúa como agente complejante, formando complejos tanto solubles como insolubles con los metales pesados proporcionando una mayor o menor movilidad de estos en los sedimentos (Harbinson, 1986). Suduan y colaboradores en 1997, proponen el siguiente orden de estabilidad para complejos organometálicos en suelos $Pb > Zn > Cd$.

La salinidad en el sedimento de la estación más cercana a la boca de la CGSM (estación 1) alcanzó un valor de 6, en las otras dos estaciones la salinidad fue cero (Tabla 1) La salinidad en la estación 1 puede ser explicada por la cuña salina que se produce por el movimiento de las ma-

sas de agua provenientes del cuerpo de la CGSM. En sistemas de manglar, el ión Cl^- puede formar varios complejos con los metales, los cuales se pueden intercambiar y aumentar o disminuir su disponibilidad al medio acuático (Lacerda, 1998, Harter y Naidu, 2001). Al aumentar la salinidad los cloruros pueden competir con las partículas para acomplejar los metales disueltos es por esto que en la época seca las concentraciones de algunos metales pesados en sedimentos disminuyen (INVEMAR, 2003).

Los altos contenidos de limos y arcillas (Tabla 1) se deben en parte a la acción que ejercen de las raíces de los árboles de manglar como trampas de sedimentos suspendidos. Estas raíces reducen la perturbación física provocada por la corriente del río, permitiendo una alta tasa de sedimentación. Los altos contenidos de limos y arcillas favorecen los procesos de retención de metales pesados en el sedimento. Se ha establecido que metales como el Pb, tienen una fuerte afinidad de adsorción en la fracción de arcilla, debido a la mayor área superficial lo que favorece la retención de metales pesados, de materia orgánica, de óxidos de Fe-Mn y de sulfuros, los cuales se fijan a la superficie de las arcillas, donde los iones metálicos se adsorben principalmente por intercambio iónico y adsorción específica (Harbinson, 1986).

Ensayos de Adsorción

La concentración biodisponible y total de Pb, Cd y Zn se muestra en la tabla 1. Las concentraciones biodisponibles y totales de Pb y Zn son diferentes, lo cual evidenciaría que éstos metales están siendo acumulados en el sedimento en formas no biodisponibles para los organismos y que la entrada de Pb y Zn es mucho mayor que la de Cd.

La adsorción de los metales Cd, Pb y Zn sobre el sedimento muestreado se representó por las respectivas isothermas (concentración en $\mu\text{g/g}$ del metal adsorbido en función de la concentración en $\mu\text{g/mL}$ de la solución en equilibrio) en el rango de concentración añadida: entre 129 y 3899 $\mu\text{g/g}$ para Pb; 8.6 y 39 $\mu\text{g/g}$ para Cd; 643 y 4873 $\mu\text{g/g}$ para Zn. En la figura 2 se muestra como la adsorción de Pb y Zn sobre el sedimento fue mayor a bajas concentraciones en solución y a medida que aumentó la concentración, la pendiente disminuyó. Para el Cd, la adsorción aumentó con la concentración en solución, sin llegar a disminuir su pendiente, esto puede indicar que el Cd tiene una mayor afinidad por los sitios de adsorción que los otros elementos estudiados.

Cuando las concentraciones añadidas de los tres elementos fueron iguales (77 a 3976 $\mu\text{g/g}$), las isothermas de adsorción para cada metal sobre el sedimento mostraron

Tabla 1. Variables fisicoquímicas y concentración de metales pesados analizados en el sedimento superficial asociado a *R. mangle* en las tres estaciones de muestreo del Río Sevilla CGSM.

Variable	Estación 1	Estación 2	Estación 3
pH	6,71	6,57	6,20
Eh (mV)	-375	-360	-130
Salinidad	6	0	0
% Materia Orgánica	29	27	26
% Limos y arcillas	56	49	49
Humedad	84	83	81
Biodisponible $\mu\text{g/g}$			
Cd	0,407	0,506	0,219
Pb	5,914	7,103	4,891
Zn	32,822	39,934	20,068
Total $\mu\text{g/g}$			
Cd	0,616	0,751	0,919
Pb	98,114	85,917	72,130
Zn	91,252	88,920	75,888

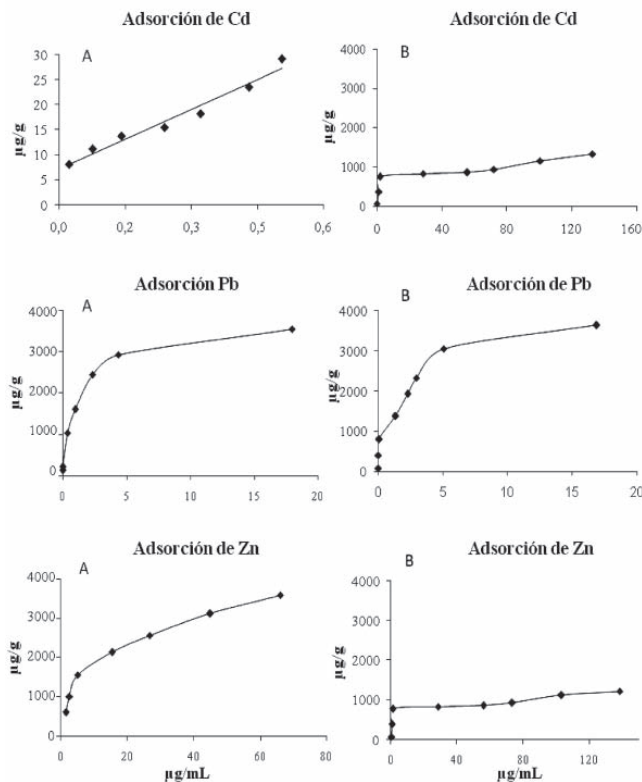


Figura 2. Isothermas de adsorción de Cd, Pb y Zn en sedimento asociado a *R. Mangle* (A) adsorción a bajas concentraciones de Cd; (B) Adsorción a concentraciones iguales de los tres elementos.

que la mayor adsorción se produjo a bajas concentraciones en solución y a medida que la concentración en solución aumentó la adsorción disminuyó (Figura 2A). A diferencia del ensayo en el cual la concentración de Cd era mucho menor que los otros metales, la adsorción del Zn disminuyó ostensiblemente (40-60 %), lo cual indica una fuerte competencia entre el Cd y el Zn por los sitios de adsorción en el sedimento, lo cual se puede deber a la similitud química entre estos elementos (electronegatividad, estado de oxidación) (Figura 2B). En experimentos realizados por Chantawong y colaboradores (2003), se mostró que la presencia de Cd produce un descenso significativo en la adsorción de Zn, mientras la adsorción de Pb no se ve afectada, de igual manera que nuestros experimentos de adsorción en sedimentos de mangle.

La forma funcional de las isothermas de adsorción para Cd, Pb y Zn presenta un comportamiento típico, caracterizado por un descenso de la pendiente al aumentar la concentración en equilibrio. Esto refleja una alta afinidad del adsorbente (metal) por el adsorbato (partículas de sedimento) a bajas concentraciones, la cual disminuye al aumentar

la concentración. Este comportamiento implica que todos los sitios de adsorción del sedimento son equivalentes e igualmente disponibles para los metales, los cuales muestran además una elevada afinidad por este tipo de sedimento.

Para cuantificar y comparar la extensión de la adsorción de Pb, Cd y Zn sobre el sedimento se ajustaron los datos a los modelos de Langmuir y de Freundlich (Tabla 2). Desde el punto de vista de los valores de la regresión lineal (R), la isoterma de Langmuir describió muy bien el proceso de adsorción de Pb, Cd y Zn sobre el sedimento asociado a la planta de mangle de la CGSM. De las constantes b y K del modelo de Langmuir se concluye que en el primer ensayo donde la concentración de Cd era mucho menor a la de Pb y Zn, los dos últimos elementos presentaron el mismo grado de adsorción (Tabla 2), en tanto que en el segundo ensayo, donde las concentraciones de los tres metales fueron iguales, se presentó una competencia entre el Cd y el Zn por los sitios de adsorción, mientras que el Pb continuó teniendo mayor afinidad al sedimento (Tabla 2). Los Parámetros del modelo de Freundlich (Tabla 2) corroboraron lo encontrado con el modelo de Langmuir, que mostró una alta afinidad del Pb por los sitios de adsorción en el sedimento y competencia entre el Zn y Cd por estos sitios (Chantawong et al., 2003).

En el primer ensayo ($Cd \ll Pb$ y Zn) el coeficiente de adsorción K_d para Pb y Zn fue 3333, este coeficiente es dado por la pendiente de la isoterma de Langmuir. Cuando la concentración de Cd se igualó a la de Pb y Zn (segundo ensayo), el valor de K_d para Pb no cambió, pero el valor de K_d para Zn disminuyó e igualó al valor de K_d para Cd, 1111 (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de las isothermas de adsorción utilizando los modelos de Langmuir y Freundlich en los dos ensayos realizados Ensayo 1. Bajas concentraciones de Cd, ensayo 2, concentraciones iguales de Cd, Pb y Zn.

		Langmuir			Freunlich		
		R	B (Kd)	K	R	n	k
Ensayo. 1	Cd	0,838	33	200	0,924	0,38	31
	Pb	0,994	3333	5000	0,931	0,32	1629
	Zn	0,984	3333	417	0,9604	0,43	638
Ensayo. 2	Cd	0,968	1111	263	0,807	0,10	14
	Pb	0,972	3333	3333	0,933	0,29	1620
	Zn	0,976	1111	196	0,602	0,30	281

R= coeficiente de regresión lineal

B= Pendiente de la isoterma de adsorción Langmuir que representa el K_d (Coeficiente de distribución).

K= constante de energía de enlace.

n= Pendiente de la isoterma de adsorción Freundlich que representa los sitios activos.

k= capacidad de adsorción Freundlich.

Valores de K_d altos, indican que el metal esta siendo retenido por la fase sólida a través de reacciones de adsorción. Por el contrario, valores bajos de K_d indican que una amplia fracción del metal permanece en solución (Gómez et al., 2001). En los dos ensayos, el rango de los coeficientes de distribución indica una fuerte adsorción a bajas concentraciones, la cual disminuye al aumentar la concentración, esto puede deberse a la afinidad de los elementos por los sitios altamente selectivos (adsorción específica) a bajas concentraciones y una adsorción en los sitios menos selectivos (adsorción no específica) a medida que va aumentando la cantidad de metal adiciona-

do. Teniendo en cuenta lo valores de K_d para la adsorción de los metales pesados en estudio se obtuvo un patrón de adsorción de $Pb \gg Zn = Cd$.

Los resultados de los ensayos de adsorción y las concentraciones de metales medidas en los sedimentos del ecosistema de manglar mostraron que hay un patrón de distribución para estos metales. La mayor concentración de Pb esta en formas no móviles o retenidas por el sedimento, mientras que la mayor proporción de Zn y Cd se encuentra en formas móviles o biodisponibles.

Ensayo desorción en función de la salinidad

La salinidad juega un papel importante en la movilidad de metales pesados en sistemas estuarinos, ya que con el ión Cl^- los metales pueden formar varios complejos, los cuales se pueden intercambiar y aumentar o disminuir su disponibilidad al medio acuático (Lacerda, 1998, Harter y Naidu, 2001). Los estudios de desorción se realizaron para determinar la reversibilidad de las reacciones de adsorción frente a la variación de la salinidad y tener una idea de la fuerza de la asociación del metal con la superficie del suelo.

Las isotermas de desorción mostraron una sustancial histéresis de adsorción-desorción (Figura 3), esto sugiere que los iones metálicos de Pb, Cd y Zn son específica o químicamente adsorbidos por la materia orgánica y por las capas de silicatos de arcillas, donde quedan retenidos (Wu et al., 1999).

Por otra parte, las isotermas de desorción, mostraron que al aumentar levemente la salinidad, entre 5 y 15 unidades, ocurre la mayor desorción de Cd y Zn (85 y 72 % respectivamente), pero por encima de estos valores de salinidad, el porcentaje de desorción tiende a mantenerse constante (Figura 3). Para el Pb, el aumento de la salinidad fue directamente proporcional al aumento del porcentaje de desorción. Estos ensayos mostraron que la salinidad tiene un efecto sobre la movilidad del Pb, Cd y Zn desde el suelo hacia la columna de agua, debido a la formación de complejos de los metales con el ion Cl^- . El orden de desorción encontrado fue $Cd > Zn > Pb$.

Las concentraciones de metales en aguas reportadas por INVEMAR, 2003, mostraron incremento de concentración de Cd, Pb y Zn durante la época seca. Estos resultados guardan estrecha relación con lo encontrado en los ensayos de desorción, ya que durante la época seca la salinidad aumenta hasta valores de cercanos a 25, permitiendo que los metales sean liberados del sedimento y pasen a la columna de agua.

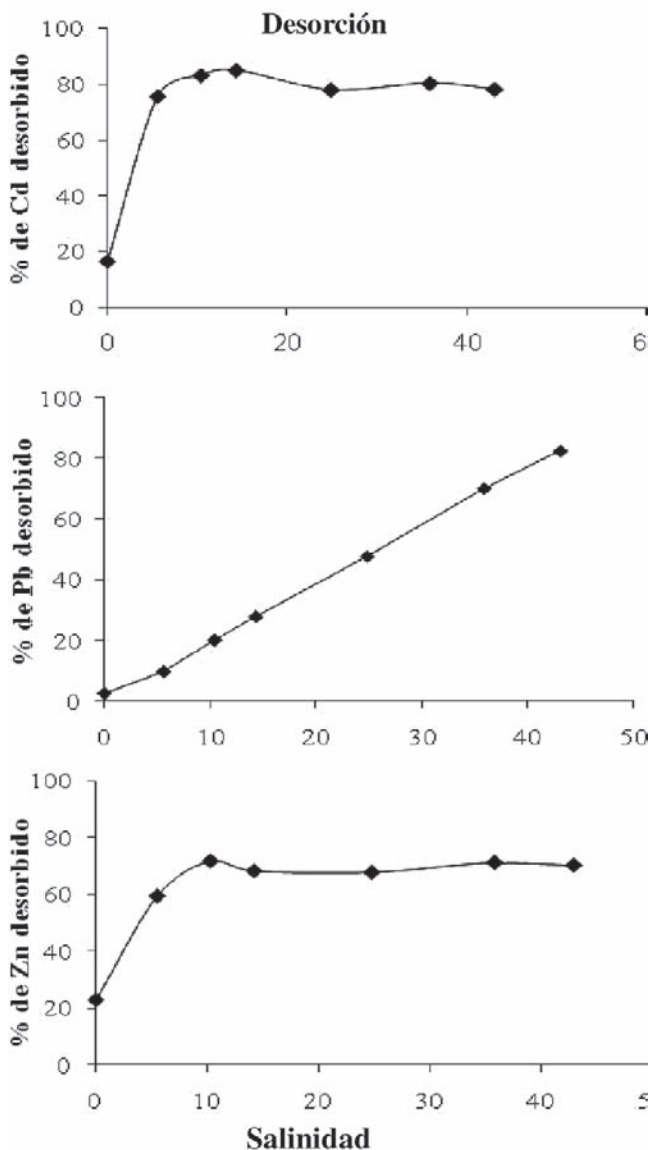


Figura 3. Isotermas de desorción de Cd, Pb y Zn del sedimento asociado a *R. Mangle* en función de la salinidad.

Conclusiones

Los ensayos de adsorción permitieron establecer que sobre el sedimento del Río Sevilla CGSM, asociado a la planta de *R. mangle* el Pb tiene mayor capacidad de adsorción que el Cd y el Zn. Lo cual se refleja en las concentraciones biodisponible y total de estos tres metales en el sedimento, donde se encontró la mayor concentración de Pb en la fase inmovilizada.

Con los ensayos de desorción, se pudo establecer que el aumento de la salinidad tiene un efecto positivo sobre la desorción de los metales Cd, Pb y Zn, siendo mayormente desorbido el Cd, seguido del Zn y en menor proporción el Pb, lo cual explicaría.

Bibliografía

- Alloway, B.J.**, 1995. Heavy metals in soils. 2 ed. Blackie Academic y professional. Londres.
- Altmann, R.S. y A.C. Bourg.** 1997. Cadmium mobilization under conditions simulating anaerobic to aerobic transition in a landfill leachate-polluted aquifer. *Water, Air and Soil Poll.* **94**: 385-392.
- Alumaa, P. E Steignes, U. Kirso, y V. Petersell.** 2001. Heavy metal sorption by different Estonian soil types at low equilibrium solution concentrations. *Proc. Estonian. Acad. Sci. Chem.* **50**(2): 104-115.
- Chantawong, V, N.W. Harvey y V.N. Bashkin.** 2003. Comparison of heavy metal adsorptions by thai kaolin and ballclay. *Water, Air, and Soil Poll.* **148**: 111-125.
- Davranché, M. y J. Bollinger.** 2001. A description/dissolution model for metal release from polluted soil under reductive conditions. *J. Environ. Qual.* **30**: 1581-1586.
- Garay, J., G. Ramírez, J. Betancourt, B. Marín, B. Cadavid, L. Panizzo, L. Lesmes, J.E. Sánchez, H. Lozano y A. Franco.** 2003. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos: aguas, sedimentos y organismos. INVEMAR. Santa Marta.
- Gómez, C.P., P.M. Fontes, G.A. Da Silva, S.E. Mendonca y R.A. Netto.** 2001. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**: 1115-1121.
- Hall, L.A.** 1991. A preliminary investigation into the speciation of trace metals in sediments from the gulf of Paria off the coast of Trinidad. *Environ. Internal.* **17**: 437-447.
- Harbinson, P.** 1986. Mangrove muds. A sink and a source for trace metals. *Mar. Poll. Bull.* **17**(6): 246-250.
- Harter, R.D. y R. Naidu.** 2001. An assessment of environmental and solution parameter impact on trace-metal sorption by soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **65**: 597-612.
- Houng, K. y D. Lee.** 1998. Comparisons of linear and non-linear Langmuir and Freundlich curve-fit in study of Cu, Cd and Pb adsorption on Taiwan soils. *Soil Sci.* **163**(2): 115-121.
- INVEMAR,** 2003. 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 Ejecutivo 1999-2002. Convenio MMA-BID-INVEMAR. Santa Marta.
- Lacerda, L.D.** 1998. Trace metals biogeochemistry and diffuse pollution in mangrove ecosystems. *ISME. Mangrov. Ecosys. Occasional papers.* **2**:1-65.
- McLaren, R.G., C.A. Backes, A.W. Rate y R.S. Swift.** 1998. Cadmium and Cobalt desorption kinetics from soil clays: Effect of sorption period. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **62**: 332-337.
- Parra, J.P. y L.F. Espinosa.** Distribución de metales pesados (Pb, Cd y Zn) en perfiles de sedimento asociado a *Rhizophora mangle* en el Río Sevilla - Ciénaga Grande de Santa Marta. *Bol. Invest. Mar. Cost.* (sometido).
- Piwoni, D.M. y W.J. Keeley.** 1990. Basic concepts of contaminant sorption at hazardous waste sites. EPA. Ground Water Issue. US.
- Seuntjens, P., K. Tirez, J. imunek, M.Th. Van Genuchten, C. Cornelis, y P. Geuzens.** 2001. Aging effects on Cadmium transport in undisturbed contaminated sandy soil columns. *J. Environ. Qual.* **30**: 1040-1050.
- Silva, G.G.,** 1998 Estudio de la adsorción competitiva de Cd, Ni y Zn sobre una Bentonita. Tesis de Química. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Suduan, G.; W. J. Walker; R. A. Dahlgren y J. Bold.** 1997. Simultaneous sorption of Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, and Cr on soils treated with sewage sludge supernatant. *Water, Air and Soil Poll.* **93**: 331-345.
- Wallner-Kersanach, M.** 1997. Asesoría a corto plazo para calidad de aguas. Informe para PROCIENAGA, Santa Marta.
- Wu, J., D.A. Laird, y M.L. Thompson.** 1999. Sorption and desorption of Copper on soil clay components. *J. Environ. Qual.* **28**: 334-338.
- Yin, Y., H.E. Allen, C.P. Huang y P.F. Sanders.** 1996. Adsorption of mercury (II) by soil: Effects of pH, chloride, and organic matter. *J. Environ. Qual.* **25**: 837-844.
- Yin, Y., H.E. Allen, C.P. Huang y P.F. Sanders.** 1997. Adsorption/desorption isotherms of Hg (II) by soil. *Soil. Sci.* **162**: 35-45.

Recibido: agosto 2 de 2006

Aceptado para su publicación: agosto 10 de 2007

DEFORMACIONES VOLUMÉTRICAS CON Y SIN COLAPSO DE ALGUNOS SUELOS NO SATURADOS

Por

Miguel Angel Alfaro Soto¹

Resumen

Alfaro Soto, M. A.: Deformaciones volumétricas con y sin colapso de algunos suelos no saturados. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 355-362, 2007. ISSN 0370-3908.

Este artículo presenta el análisis de resultados de deformaciones producidas al utilizar dos trayectorias de tensiones con y sin la generación del colapso en algunos suelos arenosos y limosos saturados y no saturados. Para ese objetivo fue necesario el uso de un edómetro convencional y particularmente, un otro, que permite la imposición de la succión para el estudio deformacional de suelos no saturados. Los resultados mostraron la influencia del grado de saturación en la deformación de los suelos no saturados y principalmente en el comportamiento de un suelo colapsable. En la práctica, esos procesos mecánicos pueden ocasionar, efectos indeseados caso no sean llevados en consideración en los diseños.

Palabras clave: Deformaciones volumétricas, edómetro con control de succión, suelo no saturado.

Abstract

This paper presents the analysis of results of deformations produced when using two stress paths with or without the generation of the collapse in some sandy and silty saturated and unsaturated soils. For that objective, the oedometer conventional and particularly, another that allows the suction control for deformational unsaturated soils studies were necessary to use. The results showed the influence of the saturation degree in the deformation of unsaturated soils and principally, in the collapsible soil behavior. In the practice, those mechanical processes could cause, undesired effects if there were not considered in the projects.

Key words: Volumetric deformations, oedometer with suction controlled, unsaturated soil.

¹ Doctor, Laboratorio de Estudos de Bacias (LEBAC), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro – SP, Brasil, alfaro@rc.unesp.br.

Introducción

Son de gran importancia las deformaciones que pueden ocurrir en los suelos o en las estructuras apoyadas sobre ellos, cuando son causadas debido a aumentos de humedad por efectos de infiltración natural o causadas por el hombre. Aunque se tenga conocimiento de esto, difícilmente se ha observado diseños que lleven en consideración esos efectos. Un caso particular de la deformación es el colapso de suelos porosos naturales que se destacan por ser los causadores de varios problemas de la ingeniería, interfiriendo en las soluciones de diseños o afectando obras como: canales, terraplenes, cortes de talud, túneles y diferentes obras de la construcción civil.

Se define como colapso al fenómeno caracterizado por la brusca reducción de volumen ocasionado por el aumento de la humedad, con presencia o no de sobrecarga (Dudley, 1970).

Los suelos colapsables pueden constituirse en diferentes depósitos de suelos como: eólicos, aluvionales, coluvionales, residuales, flujos de lodo y terraplenes compactados. La formación de esos depósitos depende de las variaciones climáticas y el ambiente geológico (Dudley, 1970; Aragão & Melo, 1982).

Las características de los suelos colapsables dependen de la estructura que pueden presentar. Su estructura se muestra macro-porosa, donde las partículas menores se mantienen en equilibrio meta-estable por la presencia de un vínculo que es capaz de ofrecer al suelo una resistencia adicional temporal, proveniente de las tensiones capilares, fuerzas electromagnéticas de superficie y la presencia de sustancias cementantes, como óxido de hierro y carbonatos (Dudley, 1970).

El humedecimiento de estos suelos provoca la destrucción de las fuerzas estabilizadoras, con una disminución de la resistencia de ese suelo, lo que provoca, un desplazamiento relativo entre las partículas, de tal forma que, estas pasan a ocupar los espacios vacíos de la estructura del suelo lo que resulta en la reducción brusca del índice de vacíos.

Ensayos de laboratorio y campo pueden ser realizados con la finalidad de identificar y cuantificar el grado de colapsabilidad de los suelos.

Entre los ensayos de campo Ferreira & Lacerda (1993), desarrollaron el "expanso-colapsómetro", aparato destinado para medir las deformaciones volumétricas *in situ*. Los autores, afirman que, ese aparato permite medir deformaciones con control del caudal de inundación siendo

posible realizar en campo, ensayos similares a los edométricos doble y simple utilizados en laboratorio.

Los ensayos de laboratorio son destinados a identificar e evaluar la estructura del suelo y pueden ser realizados con ensayos químicos, difracción de rayo X y microscopio electrónico.

Otros ensayos de laboratorio son realizados en edómetros, que permiten una previsión de la deformación resultante del colapso estructural del suelo, así como, parámetros cualitativos del grado del colapso. Existen dos modalidades de procedimientos de ensayos. La primera, corresponde al ensayo edométrico simple realizado con una muestra de suelo inundada para una determinada tensión de interés y la segunda, es el ensayo edométrico doble, realizado con dos muestras, una con humedad natural y otra inundada en el inicio del ensayo. Detalles de estos procedimientos pueden ser encontrados en Jennings & Knight (1975).

Criterios de identificación y clasificación de suelos colapsables se encuentran disponibles en la literatura especializada y son basados en los índices físicos, límites de consistencia (Denisov, 1951; Gibbs & Bara, 1967; Reznik, 1989), así como, criterios que utilizan los resultados del ensayo de adensamiento con inundación de la muestra de suelo (Jennings & Knight, 1957). Un resumen de los diferentes criterios de identificación o clasificación pueden ser encontrados en Vilar *et al.*, (1981).

Los criterios basados en los índices físicos y límites de consistencia ofrecen una caracterización cualitativa, en cuanto los basados en ensayos de adensamiento permiten, adicionalmente, evaluar la magnitud de las deformaciones provenientes del colapso de la estructura del suelo.

Edómetro para medición de los cambios de volumen con imposición de la succión

La medición de los parámetros o variables del estado tensional de los suelos no saturados necesitan de un aparato especial que permita un control de las presiones de aire, agua y tensión total. Diversos aparatos de compresión confinada y triaxiales con imposición de la succión han sido desarrollados utilizando diferentes métodos o técnicas con la finalidad de analizar la deformabilidad de los suelos no saturados. Una de las técnicas adaptadas a los equipamientos de compresión confinada, es el edómetro basado en la técnica de translación de ejes.

Utilizado inicialmente en aparatos (cámaras o membranas de presión en laboratorio) para determinación de

la capacidad de retención de agua en el suelo Escario (1967, 1969) e posteriormente, Barden *et al.*, (1969), Moore & Millar (1971), Fredlund & Morgenstern (1976) adaptaron el método de translación de ejes (Hilf, 1956) a una célula edométrica. La Figura 1 ilustra el edómetro basado en la técnica de translación de ejes desarrollado por Escario (1967, 1969).

El aparato básicamente consiste en una célula provista de una placa porosa de alto valor de entrada de aire (junto con una membrana semipermeable para succiones mayores que 1.500 y menores que 10.000 kPa) y de un pistón vertical a través del cual es posible la aplicación de las tensiones normales, así como, la medición de los cambios de volumen de la muestra de suelo.

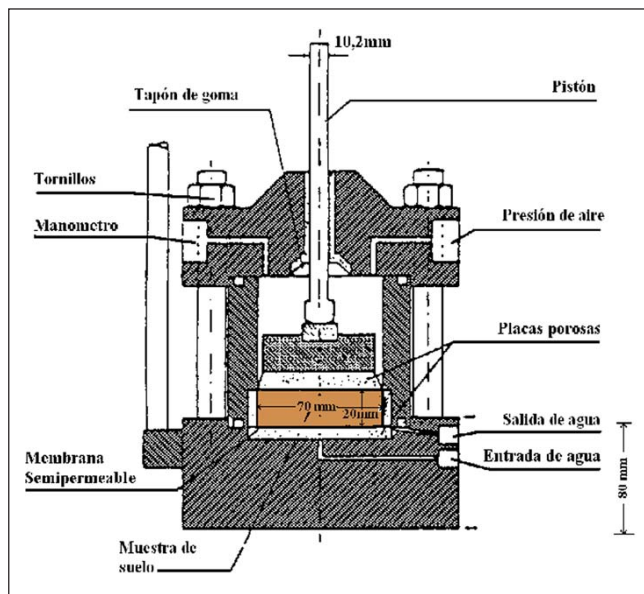


Figura 1. Edómetro con control de la succión basado en la técnica de translación de Ejes (Escario 1967, 1969).

Materiales y métodos

Suelos ensayados

Un suelo areno-arcilloso compactado, identificado por AAC, fue retirado del Campus II de la Escuela de Ingeniería de São Carlos-SP, Brasil, y está compuesto por sedimento coluvio-aluvionar de la edad Cenozoica.

Estos sedimentos se caracterizan por presentar retrabajamiento debido al transporte de materiales del Grupo Bauru y de las Formaciones Serra Geral y Botucatu. Localmente, el material presenta características lateríticas generadas por el proceso de intemperie, con estructura

porosa y colapsable frente al humedecimiento cuando sometido a determinados valores de sobrecarga. El suelo limoso compactado, consiste en una dolomita comercial y que fue denominada como DCC.

En la Tabla 1 son mostradas algunas características de los materiales estudiados.

Tabla 1. Características de los suelos ensayados

Suelo	G.C (%)	r (g.cm ³)	w (%)	e	Sr (%)	LL (%)	Lp (%)
AAC	80	1,55	11,0	1,05	31	26	19
DCC	80	1,52	16,1	0,91	32	25	16

G.C: grado de compactación en (%); r: masa específica en (g/cm³); w: humedad en (%); e: índice de vacíos; Sr: grado de saturación en (%); LL: límite líquido en (%); LP: límite plástico en (%).

Ensayos realizados

Edométricos convencionales

Fueron realizados ensayos edométricos convencionales con muestras de cada uno de los suelos utilizados. Las muestras de suelo fueron de 7cm de diámetros y 2cm de altura y fueron inicialmente saturadas antes de la aplicación de las cargas. La aplicación de las cargas fue duplicándose en magnitud después de la estabilización de las deformaciones aplicadas por la carga anterior. Las cargas aplicadas en todos los casos fueron de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 400, 800 y 1600kPa.

Edométricos con imposición de la succión

Los ensayos de compresión confinada basados en el método de translación de ejes fueron realizados utilizando el aparato desarrollado por Machado & Vilar (1995) de características similares al de Escario (1969). Las Fotos 1 y 2 muestran el edómetro desmontado y montado en una prensa de adensamiento respectivamente.

El procedimiento de ensayo para ese edómetro fue similar a los sugeridos por los mismos autores. Consistió en colocar una muestra de suelo (de 7cm de diámetro e 2cm de altura) en contacto directo con la placa de alta presión de entrada de aire, ambos previamente saturados, utilizando para ese objetivo, la propia base del edómetro conectada a una fuente de alimentación de agua.

Durante esa etapa no es aplicada a la muestra, ninguna presión de aire, permaneciendo de esa manera, durante dos días aproximadamente. Luego, es aplicada dentro de la cámara, una presión de aire equivalente a la succión deseada, así, después de la eliminación parcial del agua

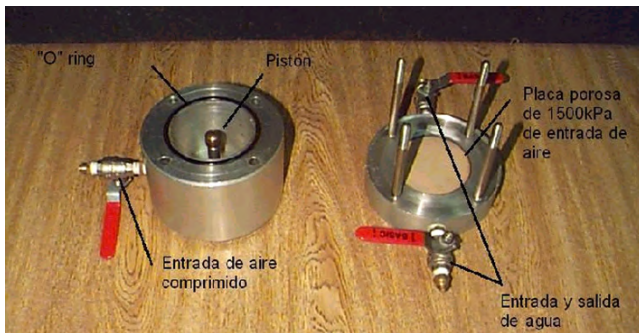


Foto 1. Componentes del edómetro basado en la técnica de translación de ejes (Machado & Vilar, 1995).

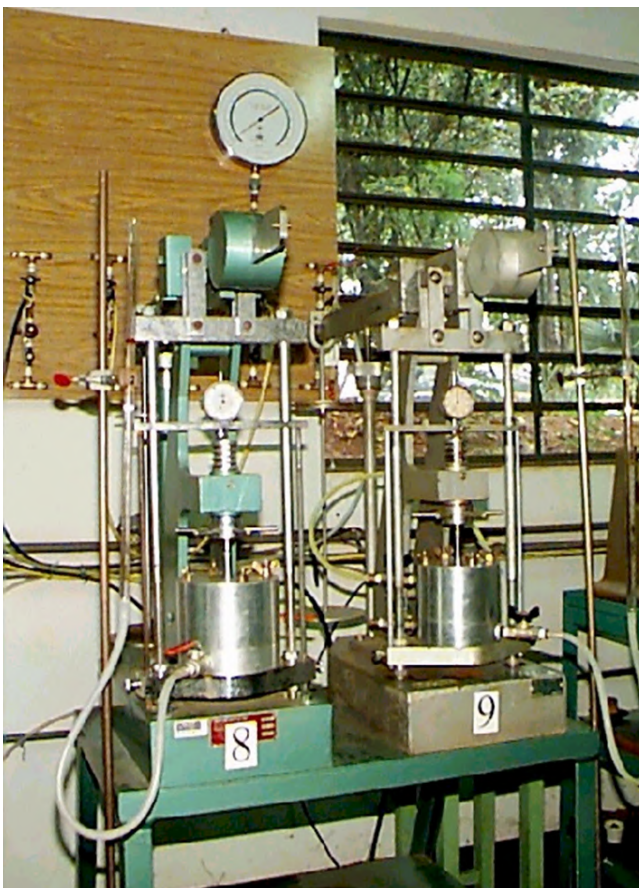


Foto 2. Edómetro montado en una prensa de adensamiento.

de la muestra a través de la placa porosa es alcanzado un equilibrio de succión en el suelo.

Las variaciones de humedad en cada valor de succión son registradas por la medida de volumen del agua expulsada en una bureta graduada. Cuanto a la aplicación de las tensiones verticales estas fueron similares a las utilizadas en un edómetro convencional.

Fueron realizados dos tipos de trayectorias T1 y T2, para estudiar el comportamiento deformacional de los suelos y que son ilustrados en la Figura 2 como succión ($u_a - u_w$) versus tensión de sobrecarga (p) aplicada. Los ensayos según la trayectoria de tensiones T1 fueron destinados a observar la variación de la deformación con los cambios de succión y consistieron en aplicar cargas al suelo (5, 10, 25, 50, 100, 200, 400, 800 y 1600kPa) sometidos a succión constante, desde el inicio, hasta el fin de la aplicación de la carga. Las succiones impuestas fueron de 45, 105, 215 y 410kPa.

Los ensayos con trayectorias de tensiones T2, tuvieron como objetivo, observar el comportamiento colapsable del suelo no saturado. Para ese objetivo, después de llevar la muestra de suelo a la succión inicial deseada, se aplicó una carga hasta una cierta tensión, para luego reducir la succión hasta que sea nula. Este procedimiento fue necesario para producir el colapso por humedecimiento del suelo (a través de la placa porosa). Posteriormente, el ensayo fue finalizado aplicando cargas a la muestra hasta alcanzar la tensión final deseada. La tensión de inundación (200kPa), fue establecida para producir magnitudes perceptivas del potencial de colapso para el estudio y fue determinada a partir de ensayos edométricos convencionales. El valor de succión impuesta precedente a la inundación fueron de 45, 105, 215 y 410kPa.

A partir de los valores de índice de vacíos antes y después del humedecimiento (e_i y e_f respectivamente) cuando sometidos a una misma tensión y adicionalmente, con el índice de vacíos inicial de la muestra (e_o) fueron determinados los potenciales de colapso (I) mediante la relación:

$$I = \frac{e_i - e_f}{e_o - e_f}$$

Análisis y discusión de los resultados

En las Figuras 3 y 4 se presentan las curvas de compresión confinada mostrados como la relación índice de vacíos (e/e_o , donde e_o es el índice de vacíos inicial) versus tensión total de carga para los suelos DCC y AAC.

Esas curvas fueron obtenidas según la trayectoria T1, con el edómetro convencional (EC para o solo saturado) y por la aplicación de la succión (45, 105, 215 y 410kPa) mediante el edómetro basado en la técnica de translación de ejes (TE). Las características de las muestras de suelo utilizadas para el ensayo son resumidas en la Tabla 2.

A partir de las curvas de compresión de las Figuras 3 y 4, se observa que, para los mismos valores de tensión ocu-

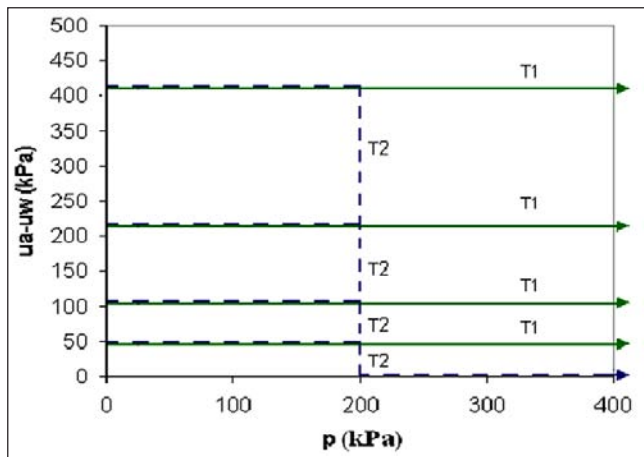


Figura 2. Trayectorias de tensiones empleadas para el estudio.

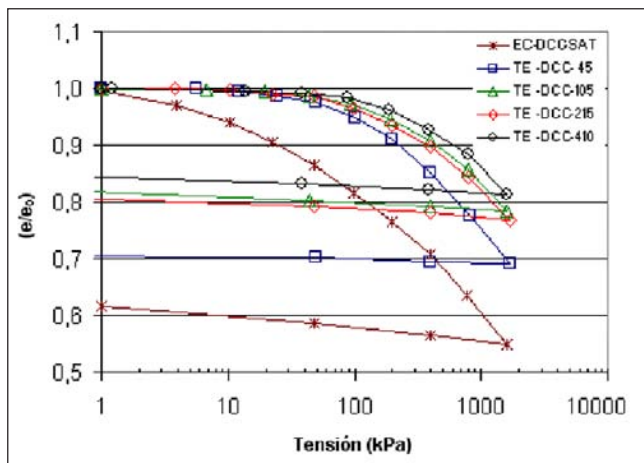


Figura 3. Ensayos edométricos convencional y con imposición de la succión, según la trayectoria T1 para la dolomita comercial compactada (DCC).

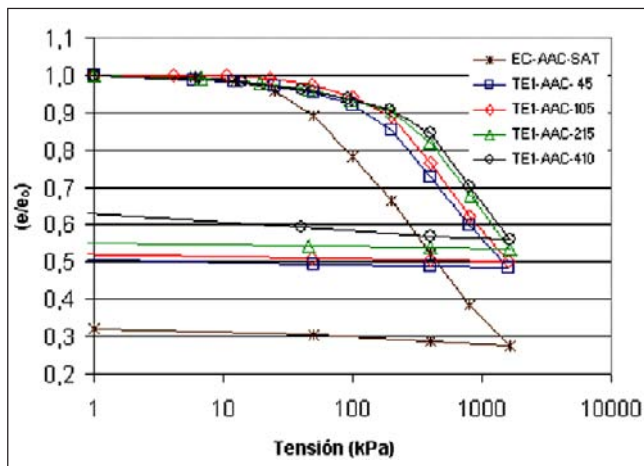


Figura 4. Ensayos edométricos convencional y con imposición de la succión, según la trayectoria T1 para el suelo arenoso arcilloso compactado (AAC).

Tabla 2. Características de las muestras de suelo empleadas en los ensayos de compresión confinada (trayectoria T1).

Succión (kPa)	Suelo			
	DCC		AAC	
	r_d	w_e	r_d	w_e
0	1,348	32,5	1,403	34,9
45	1,349	17,2	1,405	12,9
105	1,349	8,0	1,402	12,1
215	1,350	5,8	1,402	11,7
410	1,349	3,8	1,402	11,1

r_d : masa específica seca en (g/cm³); w_e : humedad de equilibrio (%) de la succión.

Se observan mayores valores de relación índice de vacíos (menor deformación), con el aumento de la succión matricial de cada suelo. Esto es esperado, debido a que, el aumento de las tensiones de succión debido a la expulsión del agua a través de la placa porosa del edómetro, propicia un aumento de la rigidez al suelo siendo más resistente a las deformaciones.

De la Figura 4, se observó también que el material AAC es más deformable (menores valores de la relación e/e_0 para un mismo valor de tensión) que el suelo DCC (Figura 3), lo que no resulta compatible con su textura, pues el primero se trata de una arena-arcillosa y el segundo de un limo, ambos compactados, con el mismo grado de compactación (80%). Al parecer, esto tiene explicación, en la naturaleza de la estructura del suelo AAC, pues como ya explicado el proceso pedológico para su formación, le concedió una estructura porosa y colapsable frente al humedecimiento. Así, este suelo tiene una mayor capacidad de reducción de vacíos o poros, por su mayor facilidad de acomodación entre sus partículas minerales.

También, a partir de las curvas de compresibilidad fueron determinadas las tensiones de pré-adensamiento (s_p) determinados con el método de Pacheco Silva e índices de compresión (C_c) que son mostrados en las Figuras 5 y 6, respectivamente, en función de la succión. En estos gráficos también fueron adicionados s_p e C_c , provenientes de ensayos convencionales (EC) en suelos saturados.

De la Figura 5, se observa que existe una relación entre las tensiones de pre-adensamiento de los suelos saturados y no saturados, pues ellos crecen con el aumento de la succión conforme el modelo de Alonso *et al.*, (1990), a través de la curva de plastificación LC.

La Figura 6 muestra que los índices de compresión del suelo AAC denotan un acrecento de C_c con el aumento de

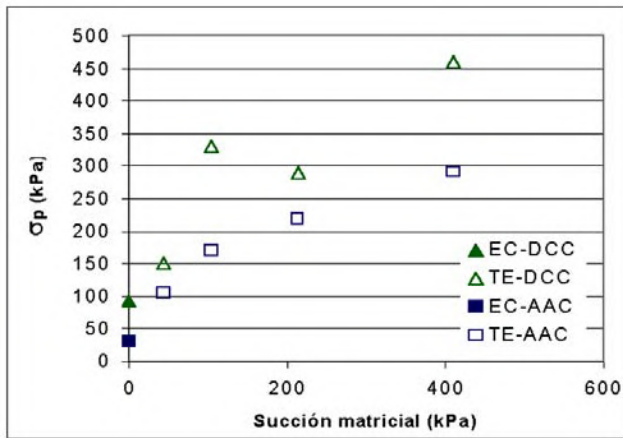


Figura 5. Tensiones de pre-adensamiento (s_p), por el método de Pacheco Silva, para los diferentes suelos, resultantes de ensayos edométricos convencionales y con imposición de la succión.

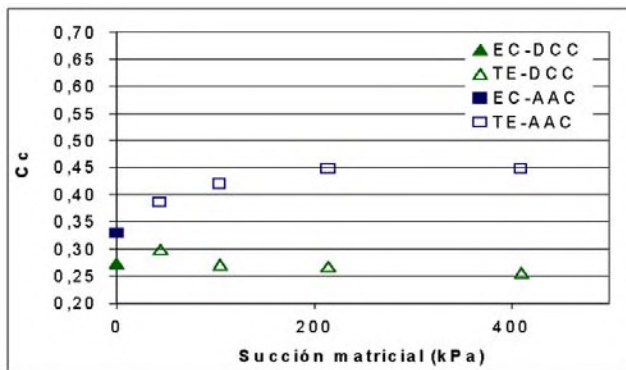


Figura 6. Índices de compresión (C_c), para los diferentes suelos, resultantes de ensayos edométricos convencionales y con imposición de la succión.

la succión, y probablemente esto ocurra hasta alcanzar un valor constante. Esto no fue observado en el suelo DCC, donde los valores fueron disminuyendo con el aumento de la succión y que siguen el comportamiento ya antes observado por Alonso *et al.*, (1990) probablemente por que las cargas utilizadas en la compresión para ese material no fueron suficientes para provocar el efecto contrario.

Las Figuras 7 e 8 se presentan las curvas de compresión confinada (representados como índice de vacíos *versus* tensión total de carga) para los suelos DCC y AAC según la trayectoria T2, obtenidas por la aplicación de la succión (45, 105, 215 y 410kPa) mediante el edómetro basado en la técnica de translación de ejes (TE). Las características de las muestras de suelo utilizadas para el ensayo son resumidas en la Tabla 3.

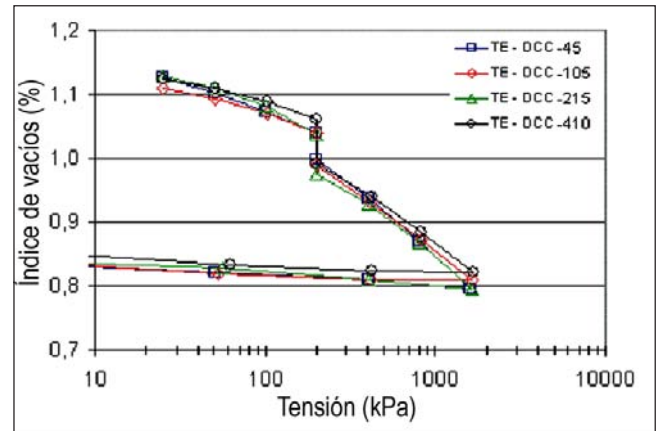


Figura 7. Ensayos edométricos con imposición de la succión, según la trayectoria T2 para (DCC).

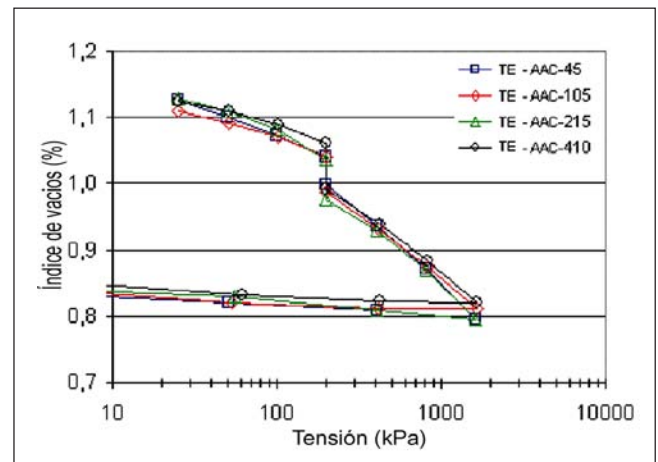


Figura 8. Ensayos edométricos con imposición de la succión, según la trayectoria T2 para (AAC).

Tabla 3. Características de las muestras de suelo empleadas en los ensayos de compresión confinada (trayectoria T2).

Succión (kPa)	Suelo			
	DCC		AAC	
	r_d	I	r_d	I
45	1,349	1,9	1,408	3,2
105	1,351	2,5	1,409	4,8
215	1,353	2,8	1,408	7,1
410	1,352	3,3	1,408	8,9

r_d : masa específica seca en (g/cm³); I: Potencial de Colapso en (%).

Al ser colocados los valores de colapso (I) en función de la succión matricial del suelo, resulta el gráfico de la Figura 7. Tanto DCC como AAC mostraron acrecimientos del potencial de colapso con el aumento de la succión. Estos

resultados corroboran el comportamiento observado en las Figuras 3 y 4 pues, valores elevados de succión rigidiza la muestra y potencializan las deformaciones por humedecimiento. No obstante, el aumento de rigidez no es necesariamente ilimitado y puede estar condicionado algún valor de succión, pues como se puede observar en la Figura 9, DCC no muestra considerables variaciones de potencial de colapso arriba de los 215kPa.

AAC presenta los mayores valores de I y siempre crecientes con el aumento de la succión, lo que muestra, la evidente capacidad de colapso de ese suelo. Sin embargo, similar a DCC se espera que I alcance un valor máximo en un determinado valor de succión.

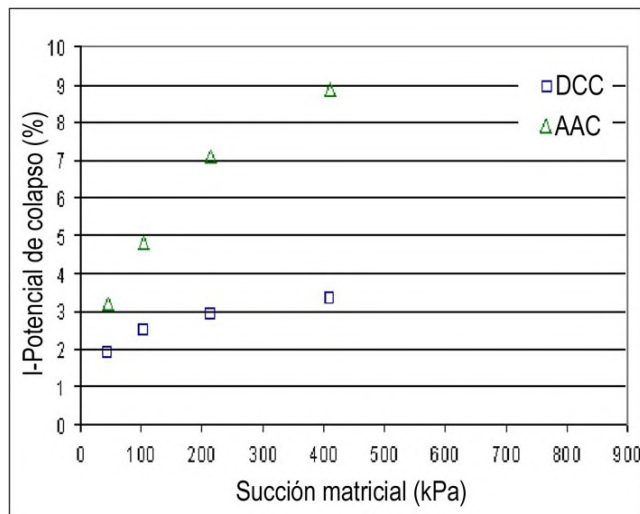


Figura 9. Potencial de colapso versus succión matricial para los suelos DCC e AAC.

Conclusión

En este artículo se mostraron aspectos del comportamiento deformacional de suelos saturados y no saturados con diferentes texturas (fina y gruesa).

Los ensayos con los edómetros convencional y con imposición de la succión permitieron evidenciar que, la magnitud de la deformación de los suelos depende principalmente (entre otros factores), de su grado de saturación. Así, se pudo observar cómo los suelos pueden ser más deformables con el aumento de la humedad debido a que esta acción desencadena la alteración del estado de tensiones por reducción de la succión existente tornando el suelo menos rígido.

Se observó también que existen suelos con características peculiares que pueden mostrar reducciones de va-

líos más drásticas en relación a otros suelos supuestamente más deformables. Esto fue evidente, cuando el suelo arenoso de características porosas resultó más deformable y con mayor potencial de colapso en relación al suelo limoso.

El colapso del suelo arenoso no solamente dependió por la variación de su estado de tensiones debido al humedecimiento. Este suelo posee una alta estructura inestable e que ocurre principalmente en sus macroporos.

A pesar de existir situaciones en que las deformaciones son producidas para la situación más crítica o de saturación (como por ejemplo, cimentaciones de presas), es evidente, que existen deformaciones debidas a los cambios de humedad sin saturación completa. Podemos mencionar deformaciones diferenciales, hundimiento de estructuras, entre otros, cuyo análisis, no deberían ser negligenciados en nuestra práctica profesional.

Bibliografía

- Alonso, E. E.; Gens, A.; Josa, A. (1990). *A constitutive model for partially saturated soils*. Géotechnique, 40, 3, p. 405-430.
- Aragão, C. J. G.; Melo, A. C. (1982). *Fundações rasas em solos colapsíveis. Um caso no semi-árido de Pernambuco*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Olinda- Recife, v.2, p. 19-40.
- Barden, L.; Mador, A.O.; Sides, G.R. (1969). *Volume change characteristics of unsaturated clays*. Journal of Soil Mechanics and Foundation. Div. A.S.C.E., v.95, SM 1, p. 33-51.
- Denisov, N. M. (1951). *The engineering properties of loess and loess loams*, Gosstroizdat, Moscow, (em Russo), apud Fedá (1966), p. 136.
- Dudley, J. H. (1970). *Review of collapsing soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundation. Division, ASCE, v.96, SM3, p. 925-947.
- Escario, V. (1967). *Measurement of the swelling characteristics of a soil fed with water under tension*. Int. Cooperative Res. On the Predictions of Moisture Contents Under Road Paviments. O.C.D.E.
- Escario, V. (1969). *Swelling of soils in contact with water at negative pressure*. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Expansive Clay Soils, Texas, A. and M. University, p. 207-217.
- Ferreira, S.R.M; Lacerda, W.A. (1993). *Variações de volume em solo colapsível medidas através de ensaios de laboratório e campo*. Solos e Rochas, São Paulo, v.16, No.4, p. 245-253.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R. (1976). *Constitutive relations for volume change in unsaturated soils*. Canadian Geot. J., 13(3), p. 261-276.
- Gibbs, H. J.; Bara, J. P. (1967). *Stability problems of collapsing soil*. Journal of the Soil Mech. And Found. Division, ASCE, v.93, m.SM4, p. 577-594.

- Hilf, J. W.** (1956). *An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils*. Denver, 1956. 109 p. (Doutorado - Faculty of the Graduate Scholl of the University of Colorado).
- Jennings, J.E.B.; Knight, K.** (1957). *The additional settlement of foundations due to a collapse of struture of sandy sub soils on wetting*. In: Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng., 4, London, v.1, p. 316-319.
- Jennings, J.E.B.; Knight, K.** (1975). *A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure*. In: Regional Conf. for Africa on Soil Mech. And Found. Eng., 6, Durban, 2V.v.1, p. 99-105.
- Machado, S. L.; Vilar, O.M.** (1995). *Estudo da compressão confinada e do colapso de um solo arenoso compactado em edômetro de sucção controlada*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. (Dissertação de Mestrado).
- Moore, P. J.; Millar, D. V.** (1971). *The collapse of sands upon saturation*. First Australia-N.Zealand Conf. on Géomechanics, Mellbourne, p. 54-60.
- Reznic, Y. M.** (1989). *Discussion of detremination of collapse potential of soils by A.J Lotenergger and R.T., Saber*. Geotechnical Testing Journal, ASTM, v.12, No.3, September, p. 248-249.
- Vilar, O. M.; Rodrigues, J .E.; Nogueira, J. B.** (1981). *Solos colapsíveis. Un problema para a engenharia de solos tropicais*. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de janeiro, p. 209-224.

Recibido: enero 19 de 2007

Aceptado para su publicación: agosto 15 de 2007

MODELACIÓN NUMÉRICA DE EVENTOS TSUNAMIGÉNICOS EN LA CUENCA PACÍFICA COLOMBIANA - BAHÍA DE BUENAVENTURA

Por

Juan C. Restrepo ^{a*} & Luis J. Otero

Resumen

Restrepo, J. C. & Luis J. Otero: Modelación numérica de eventos tsunamigénicos en la Cuenca Pacífica Colombiana - Bahía de Buenaventura. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 363-377, 2007. ISSN 0370-3908.

Se evaluó la amenaza por tsunami en el municipio de Buenaventura considerando diferentes escenarios de marea, magnitud y epicentro del sismo precursor. Los resultados indican que la variación de la magnitud del sismo precursor (M_w) genera cambios significativos en las áreas afectadas por inundación, y en la altura y tiempo de llegada del tren de olas. Un sismo de $M_w = 8.6$ produce un tsunami con alturas de ola superiores a 3.0 m., independientemente de la localización del sismo precursor. El tiempo de llegada del tsunami varía entre 56 y 92 minutos. Sin embargo, también se encontró que la configuración de la línea de costa y la morfometría de la bahía de Buenaventura reducen en un ~40% la altura del oleaje generado por un tsunami.

Palabras clave: Tsunami, modelación numérica, cuenca pacífica colombiana, bahía de Buenaventura.

Abstract

We evaluated the tsunami hazard in the municipality of Buenaventura under different tide, earthquake magnitude and epicenter location scenarios. Results indicate that earthquake magnitude (M_w) has a strong influence on potential flood areas as well as on wave height and waves arrival time. An earthquake with an M_w of 8.6 generates a tsunami with wave height higher than 3.0 m., regardless of the epicenter. The tsunami arrival time changes between 56 and 92 minutes. In the other hand, coast line configuration and bay morphometry at Buenaventura bay are two parameters that reduce in ~40% the tsunami wave height.

Keywords: Tsunami, Numerical modelling, Colombian Pacific basin, Buenaventura bay.

* Capitanía de Puerto de Tumaco (CCCP), vía al Morro. Tumaco, Nariño. Tel.: +57 (2) 7272637 Ext.: 104. Fax: +57 (2) 7272637 Ext.:122. Correo electrónico: jrestr48@eafit.edu.co, jrestrepo@dimar.mil.co

Grupo de Modelado Integral de Zonas Costeras, Centro Control de Contaminación del Pacífico (CCCP) - Dirección General Marítima, Tumaco. ^ajrestr48@eafit.edu.co

1. Introducción

En la cuenca del océano Pacífico ocurrieron cerca de 700 tsunamis durante el último siglo. Japón y Suramérica pueden considerarse como las regiones con mayor actividad tsunamigénica con un total de 123 y 102 tsunamis registrados en el periodo 1901-2000, respectivamente (**Guziakov**, 2001). Con base en los registros del Historical Tsunami Database (HTDB), **Guziakov** (2005) calculó un coeficiente de eficiencia para tsunamis de 84% para Suramérica, este coeficiente es calculado como la relación entre el número total de tsunamis y el número total de sismos costeros y submarinos de magnitud $M_s \geq 7.0$ y profundidad $h < 100$ km ocurridos en una región específica durante los últimos 100 años. Lo anterior indica que las costas occidentales de Suramérica constituyen una de las regiones más vulnerables de todo el océano Pacífico a la ocurrencia de tsunamis generados por eventos sísmicos.

El Bloque Norte de los Andes es una región de intensa actividad tectónica, en particular la franja sísmica ubicada frente al litoral pacífico sur de Colombia y norte de Ecuador (**Gutscher et al.**, 1999). Durante el siglo pasado se presentaron cuatro grandes terremotos con $M_w > 7.7$ en esta zona. El de mayor magnitud, ocurrido el 31 de enero de 1906 ($M_w > 8.7$), tuvo una longitud de ruptura estimada de 500 km, que fue parcialmente reactivada en secuencia de sur a norte durante los eventos del 14 de mayo de 1942 ($M_s > 7.9$), 19 de enero de 1958 ($M_s > 7.8$) y el 12 de diciembre de 1979 ($M_s > 7.7$) (**Mendoza y Dewey**, 1984; **Beck y Ruff**, 1984). Estos terremotos originaron tsunamis que devastaron la región costera del litoral pacífico colombo-ecuadoriano, causando graves daños y pérdidas de vidas humanas. El evento de 1979, que afectó a gran parte de los habitantes de la bahía de Tumaco (Nariño), fue significativamente desastroso.

Los daños materiales y humanos originados como consecuencia del sismo-tsunami de 1979 a lo largo de la costa sur de Colombia, desde Tumaco hasta Guapi, fueron considerables. Sólo en el departamento de Nariño se registraron cerca de 452 muertos y 1011 heridos, alrededor de 3080 viviendas fueron destruidas por completo y más de 2100 averiadas. Parte de la línea de costa de Colombia fue barrida por este tsunami. Por ejemplo, la población costera de San Juan, ubicada a 60 km al norte de Tumaco, fue destruida en su totalidad. El tsunami arrasó esta isla barrera destruyendo todas las construcciones y dejando un saldo de por lo menos 220 personas fallecidas, en su mayoría niños. En el sector nor-occidental de Tumaco se registraron inundaciones de carácter local, mientras que la Isla barrera del Guano desapareció por completo (**Ramírez y Goberna**, 1980).

Además de los efectos directos sobre las costas, también se presentaron repercusiones a escala tectónica. Por comparación entre el nivel de marea anterior y posterior al evento tsunamigénico de 1979, por los relatos de los habitantes y por las señales recogidas en campo (i.e. árboles antes verdes, medio secos y sumergidos) se comprobó la ocurrencia de subsidencia o hundimiento a lo largo de por lo menos 200 km de la costa del sur del Pacífico colombiano y norte del Ecuador (**Ramírez y Goberna**, 1980).

La evaluación del nivel de amenaza al que se encuentran expuestos los sistemas costeros como resultado de la ocurrencia de tsunamis, constituye un paso fundamental en la elaboración de programas de prevención, mitigación y reacción frente a desastres naturales. A nivel mundial, la evaluación de amenaza por tsunami se ha desarrollado por medio de la aplicación de métodos estadísticos (e.g. **Tinti**, 1991; **Tinti et al.**, 1995), o determinísticos (e.g. **Tinti y Gavagni**, 1995; **McSaveney et al.**, 2000; **Cevdet et al.**, 2002; **Hebert et al.**, 2005).

El método estadístico restringe el análisis a los tsunamis generados por fuentes sísmicas, el mecanismo de generación más frecuente. Usando relaciones teóricas entre un tsunami y los parámetros focales de una falla sísmica, la probabilidad de ocurrencia de un sismo de una magnitud dada puede ser convertida en probabilidad de ocurrencia de un tsunami. Por su parte, el método determinístico se apoya en la construcción y modelación numérica de escenarios, que se asumen como representativos o probables basándose en consideraciones técnicas (i.e. registros históricos, pruebas sísmicas y geofísicas) (**Tinti y Armigliato**, 2003).

En Colombia se ha evaluado la amenaza por tsunamis en los litorales Pacífico y Caribe utilizando métodos determinísticos (e.g. **Caicedo et al.**, 1996, 1997; **Meyer y Caicedo**, 1998; **Quiceno**, 2000; **Quiceno y Ortiz**, 2001; **Caballero y Ortiz**, 2002). Durante los últimos años, se ha evaluado el impacto del arribo de ondas de tsunami en varias poblaciones del Pacífico colombiano, concentrándose en los municipios de Tumaco (**Quiceno y Ortiz**, 2001; **Cardona**, 2004), Francisco Pizarro-Salahonda y parcialmente en Buenaventura (**Caballero y Ortiz**, 2002). Este estudio busca desarrollar un banco de modelaciones numéricas de eventos tsunamigénicos en el Pacífico colombiano, considerando diferentes escenarios de generación y magnitud sísmica, epicentros y condiciones de marea. El propósito de este banco de modelaciones consiste en definir, en forma preliminar, los eventos tsunamigénicos más desastrosos para la zona costera adyacente a la bahía de Buenaventura, principalmente para el área urbana de

este municipio (i.e. principal puerto en el Pacífico colombiano). Los resultados de este proyecto permitirán (i) resaltar la importancia del enfoque basado en escenarios para la evaluación del impacto por tsunamis; (ii) contribuir en la evaluación de la amenaza y riesgo generados por este fenómeno; y (iii) delimitar las acciones, recursos y políticas que deben ser implementadas en el mediano y largo plazo para el desarrollo de programas de mitigación de desastres y desarrollo costero sostenible.

2. Modelación numérica de eventos tsunamigénicos

2.1. Modelo numérico de generación de ondas de tsunami

Para alimentar el modelo numérico de generación es necesario conocer: (1) rumbo, (2) dirección de buzamiento, (3) ángulo de buzamiento, (4) dislocación, (5) área de ruptura, e (6) hipocentro de la falla sísmica. Con el escenario sísmico claramente definido, es posible calcular el campo de deformación del lecho marino mediante la aplicación de modelos numéricos de deformación sísmica (e.g. **Manshina y Smylie**, 1971). En este modelo el desplazamiento vertical del fondo del mar se asume como el perfil inicial del tsunami sin considerar los efectos hidráulicos ya que la longitud de la onda de tsunami es mucho mayor que la profundidad del agua.

De acuerdo con el modelo de **Manshina y Smylie** (1971), para una falla rectangular de tipo desgarre (strike-slip) con una magnitud de dislocación U_1 en dirección \hat{i}_1 se tiene una deformación,

$$u_i = \kappa U_1 \int_{\Sigma} \left[\left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} - \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \text{sen}(\delta) - \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \text{cos}(\delta) \right] dS \quad (1)$$

Para una falla de echado-dislocación (dip-slip) con una magnitud de dislocación U , la dislocación es,

$$u_i = \kappa U \int_{\Sigma} \left[\left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_3} \right) \text{sen}(2\delta) - \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} \right) \text{cos}(2\delta) \right] dS \quad (2)$$

donde u_i es el desplazamiento del fondo del mar en el punto i , evaluado por la integración de todos los puntos fuente que contribuyen al movimiento vertical del plano de falla, Σ es la superficie de falla, κ es la constante elástica de Lamé (5×10^{11} dinas cm^{-2}) y u_i^2 es el i -ésimo componente de desplazamiento en (X_1, X_2, X_3) debido a una fuerza de magnitud unitaria ($\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$) actuando en una dirección específica. El campo de deformación obtenido sirve como elemento de entrada para el modelo que calcula la propagación de ondas de tsunami.

2.2. Modelo numérico de propagación de ondas de tsunami

Se emplean modelos numéricos de propagación de ondas largas en aguas someras (e.g. **Titov y Synolakis**, 1996; **Goto y Ogawa**, 1997). En estos casos, la aceleración vertical de las partículas es despreciable comparada con la aceleración gravitacional, por lo tanto el movimiento vertical de las partículas no tiene efecto sobre la distribución de presiones y la velocidad horizontal de las partículas de agua es uniforme en la vertical (**Goto et al.**, 1997). Partiendo de estas aproximaciones, el movimiento de las ondas largas está controlado por las ecuaciones de conservación de momentum y masa,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial n}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial [u(h+n)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(h+n)]}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

donde x y y son las coordenadas en dirección oeste-este y en dirección sur-norte, respectivamente; t es el tiempo; h la profundidad del nivel de referencia de la columna de agua; η el desplazamiento vertical del agua sobre el nivel de referencia; g la aceleración gravitacional; $\frac{\tau_x}{\rho}$, $\frac{\tau_y}{\rho}$ es la fricción del fondo en las direcciones x y y , $\frac{\tau_x}{\rho}$, $\frac{\tau_y}{\rho}$ respectivamente. La fricción del fondo se expresa según las siguientes ecuaciones como,

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{1}{2g} \cdot \frac{f}{D} \cdot u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{1}{2g} \cdot \frac{f}{D} \cdot v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

donde D es la profundidad total del agua ($h + \eta$) y f es el coeficiente de fricción, el cual se obtiene de la ecuación de Manning para la rugosidad (n),

$$n = \sqrt{\frac{f \cdot D^{1/3}}{2 \cdot g}} \quad (8)$$

Reemplazando (8) en (6) y (7), las ecuaciones para la fricción producida en el fondo se expresan así,

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{g \cdot n^2}{D^{4/3}} \cdot u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (9)$$

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{g \cdot n^2}{D^{4/3}} \cdot v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (10)$$

Los caudales en las direcciones x y y , M y N , están definidos por las siguientes ecuaciones,

$$M = u \cdot (h + \eta) = u \cdot D \quad (11)$$

$$N = v \cdot (h + \eta) = v \cdot D \quad (12)$$

Reemplazando las ecuaciones (9) hasta (12) en (3) hasta (5) se obtienen las ecuaciones fundamentales de cálculo,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M \cdot N}{D} \right) + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g \cdot n^2}{D^{7/3}} \cdot M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M \cdot N}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{g \cdot n^2}{D^{7/3}} \cdot N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (15)$$

Las ecuaciones de conservación de momentum y de masa se discretizan en un esquema de diferencias finitas centrales. La integración numérica se efectúa por medio del algoritmo de "salto de rana", que consiste en un esquema explícito con aproximación de segundo orden. Este modelo utiliza la aproximación lineal (i.e. los términos de convección y fricción son despreciables) de las ecuaciones de conservación de masa y de momentum cuando la onda transita por grandes profundidades, de esta forma disminuye el tiempo de procesamiento sin sacrificar precisión en los resultados (Goto y Ogawa, 1997; Goto et al., 1997).

3. Evaluación de la amenaza por tsunami en la bahía de Buenaventura

Condiciones iniciales para la implementación de los modelos numéricos

Escenarios sísmicos

La definición del tipo y de las características geométricas de una falla sísmica constituye el paso inicial en la definición del escenario sísmico de generación de

tsunamis. Varios autores señalan que los grandes tsunamis son generados por terremotos con hipocentros poco profundos y con un movimiento vertical del fondo tipo pistón provocados por el desplazamiento de fallas normales e inversas (e.g. Steketee, 1958; Mansinha y Smylie, 1971). Para definir los escenarios sísmicos se revisaron los catálogos Harvard CMT Catalog (Harvard University, 2005) y NEIC-USGS (USGS, 2005). A partir de los registros de estos catálogos se seleccionaron sismos ocasionados por fallas normales o inversas, con magnitudes $M_w = 5.0$ e hipocentros entre 15-70 km para caracterizar los principales eventos sísmicos ocurridos en el Pacífico colombiano durante los últimos 30 años (Tabla 1).

Los eventos encontrados permiten establecer el rango de variación de los parámetros geométricos de fallas sísmicas con capacidad de generar tsunamis. Para el rumbo se observan dos grupos con valores típicos entre 0-45° y 230-357°, en donde el segundo grupo se caracteriza por eventos de menor magnitud ($M_w \leq 5.9$). El ángulo de buzamiento se identifica por presentar un rango entre 15-36° que contiene la mayor proporción de datos, mientras que para la dirección de buzamiento la mayoría de valores se encuentra entre 104 y 138° (Tabla 1).

Con base en los rangos de variación de los parámetros geométricos, en estudios sobre tsunamis históricos ocurridos en el litoral Pacífico colombiano (e.g. Beck y Ruff, 1984; Mendoza y Dewey, 1984; Gutscher et al., 1999) y estudios de prospección geofísica y sísmica desarrollados en el margen colombo-ecuadoriano (e.g. Collot et al., 2004), se ha definido como escenario sísmico para este estudio un terremoto con características geométricas y focales (rumbo/ángulo de buzamiento/dirección de buzamiento: 23°/16°/118°) similares a las del sismo del 12 de diciembre de 1979. Para el sismo de 1979 Gutscher et al. (1999) definieron unas condiciones de rumbo, ángulo y dirección de buzamiento de 30°, 16° y 118°, respectivamente. Además, los trabajos realizados por Mendoza y Dewey (1984) y Beck y Ruff (1984) muestran que los mecanismos focales para los eventos sísmicos de 1906, 1942 y 1958, que dieron origen a tsunamis, fueron similares a los del evento de 1979. También se tomó como referente para la definición del escenario sísmico la profundidad del sismo de 1979 ($h = 19.7$ km) (Harvard University, 2005).

La magnitud, epicentro y profundidad del sismo, así como la geometría de la falla sísmica son los parámetros que determinan el campo de deformación sísmica (Mansinha y Smylie, 1971). Por lo tanto, una vez definidos los parámetros geométricos es necesario establecer los epicentros probables con el fin de establecer por com-

Tabla 1. Eventos sísmicos tipo normal o inverso con $M_w \geq 5.0$ y $h = 15-70$ km registrados en el Pacífico colombiano durante 1976 – 2005 (Harvard CMT Catalog: NEIC-USGS).

Fecha (aa/mm/dd)	Longitud (° W)	Latitud (° N)	Rumbo (°)	Ángulo de buzamiento. (°)	Dirección de buzamiento (°)	Profundidad (km)	Magnitud (Mw)
1976/04/09	-79,89	0,79	32	22	136	19,4	6,6
1977/08/08	-77,78	6,93	287	19	25	15,0	5,4
1978/08/02	-78,00	7,29	21	40	38	15,0	5,5
1979/01/01	-80,46	0,59	23	24	116	18,3	5,7
1979/12/12	-78,81	2,32	30	16	118	19,7	8,1
1979/12/13	-79,49	2,88	45	19	107	15,0	6,3
1979/12/31	-79,71	1,93	31	21	129	15,0	6,0
1980/01/07	-79,06	2,74	30	15	114	15,0	5,3
1980/01/26	-79,84	2,52	12	22	76	15,0	5,6
1980/09/03	-78,53	2,63	1	20	85	37,4	6,1
1981/01/03	-78,95	2,13	253	24	-39	18,0	5,4
1981/05/16	-77,11	7,76	236	22	94	21,0	5,3
1982/08/01	-79,40	2,71	41	22	138	15,0	5,3
1982/08/14	-78,15	7,02	319	33	49	15,0	5,2
1983/04/07	-82,54	7,80	311	22	113	20,0	5,9
1983/11/22	-79,99	0,31	33	24	133	35,2	6,8
1984/07/30	-79,35	2,58	35	33	121	44,5	5,1
1985/06/10	-78,99	3,24	32	19	125	26,0	5,5
1986/01/19	-80,06	0,44	31	22	116	40,0	5,0
1987/01/13	-78,90	5,68	0	72	170	15,0	6,0
1987/03/06	-77,77	0,10	198	20	118	15,0	6,4
1988/09/20	-77,68	4,99	14	18	104	24,1	5,8
1989/06/25	-79,92	0,81	27	25	120	16,0	6,3
1991/11/19	-77,18	4,80	13	13	95	19,1	7,2
1994/09/27	-79,32	2,65	357	37	-114	15,0	5,3
1996/04/27	-79,42	2,47	44	15	110	15,0	6,1
1997/09/09	-77,82	5,47	338	28	40	24,1	5,1
1990/08/11	-78,15	0,01	323	45	53	15,0	5,3
1990/08/25	-77,93	5,71	350	36	79	35,1	5,3
1996/05/23	-77,56	6,06	349	8	82	15,9	5,7
1996/11/04	-77,21	7,47	188	43	42	15,0	6,3
1997/10/05	-79,56	2,15	345	25	-140	15,0	5,3
2000/10/08	-78,07	0,00	342	42	90	15,0	5,1
2004/06/01	-79,96	0,69	33	28	133	34,2	5,4
2004/11/15	-77,57	4,72	21	11	114	16,0	7,2

pleto los escenarios sísmicos de generación que serán utilizados para evaluar la amenaza por tsunami a la que se encuentra expuesto el municipio de Buenaventura.

Para definir los epicentros se tomaron como referencia eventos históricos (e.g. **Harvard University**, 2005; **USGS**, 2005), así como el trabajo de **Collot et al.** (2004), que basado en evidencia sísmica y geofísica sugiere que el área de ruptura del sismo de 1906, reactivada por los sismos de 1942, 1958 y 1979, se desplaza hacia el norte en dirección SW-NE. En la distribución espacial de los sismos seleccionados de los catálogos Harvard CMT Catalog (**Harvard University**, 2005) y NEIC-USGS (**USGS**, 2005) (Tabla 1), pueden observarse dos zonas principales en donde se han concentrado los sismos con po-

tencial de generar eventos tsunamigénicos (Figura 1A). Estas zonas forman una línea imaginaria en dirección SW-NE, paralela a la línea de costa y a la zona de subducción. La zona más externa está localizada cerca al límite de la plataforma continental en un área con profundidades cercanas a los 2000 m. La otra zona se encuentra sobre la plataforma continental, en una región con profundidades hasta de 500 m (Figura 1A).

Este patrón ha sido confirmado por varios estudios geológicos y sísmicos realizados en la zona de subducción colombo-ecuatorial (e.g. **Mendoza y Dewey**, 1984; **Gutscher et al.**, 1999; **Collot et al.**, 2004). Los trabajos realizados por **Mendoza y Dewey** (1984) y **Collot et al.** (1984) señalan que existen dos segmentos

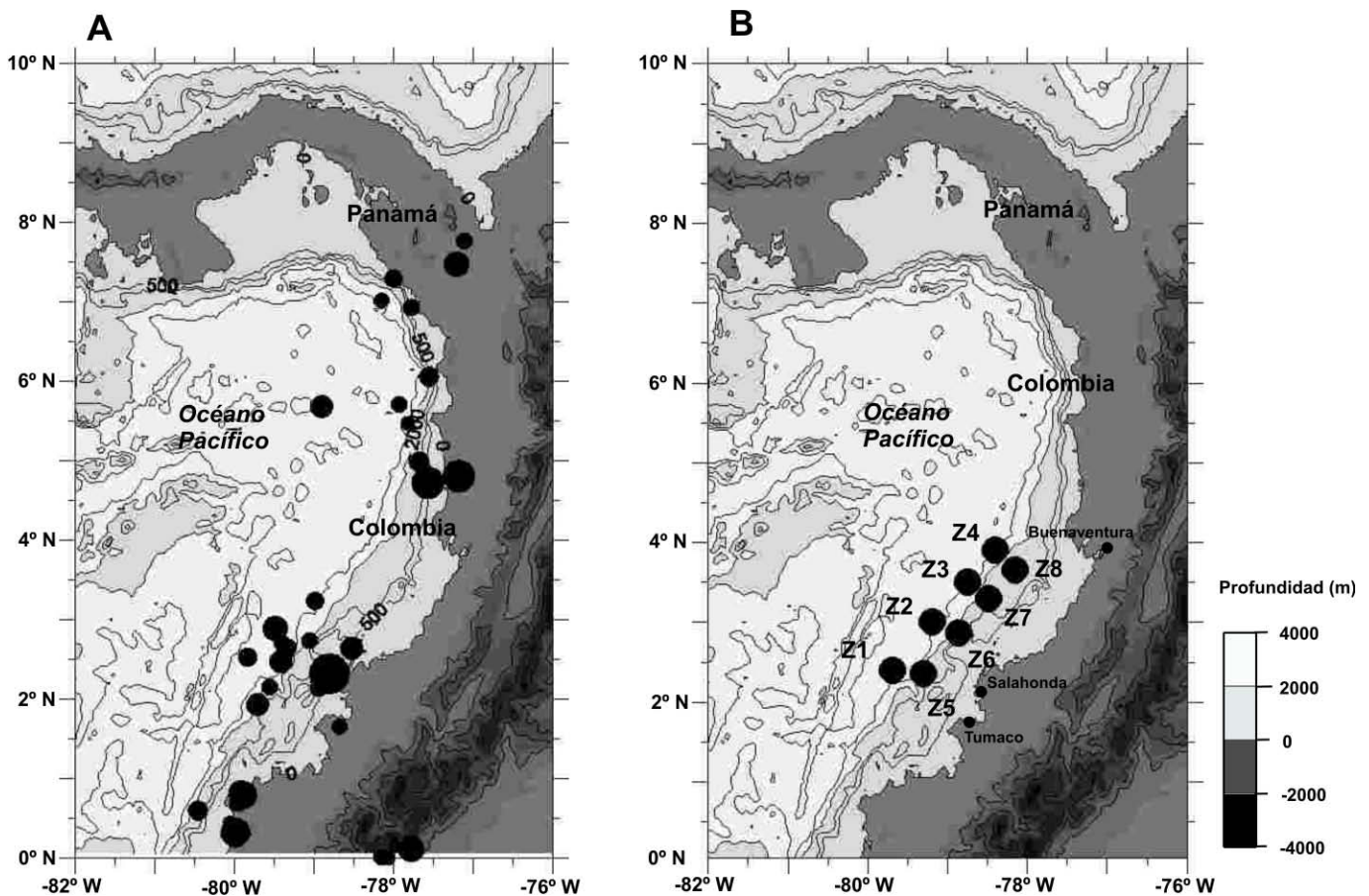


Figura 1. (A) Eventos sísmicos tipo normal o inverso con $M_w \geq 5.0$ y $h = 15-70$ km registrados en el Pacífico colombiano durante 1976 – 2005. El área del círculo es proporcional a la magnitud del sismo; círculos grandes $M_w = 8.1$; círculos pequeños $5.0 = M_w < 8.1$ (Fuente: **Harvard CMT Catalog**; **NEIC-USGS**); (B) Fuentes potenciales (epicentros) de generación de tsunamis para el litoral sur del Pacífico colombiano definidas a partir de los estudios desarrollados por **Beck y Ruff** (1984), **Mendoza y Dewey** (1984), **Gutscher et al.** (1999), y **Collot et al.** (2004); y la distribución espacial de los sismos mostrados en la Tabla 1. Epicentros seleccionados: Zona 1 (2.40° N, -79.69° W), Zona 2 (3.00° N, -79.20° W), Zona 3 (3.50° N, -78.75° W), Zona 4 (3.90° N, -78.40° W), Zona 5 (2.35° N, -79.31° W), Zona 6 (2.86° N, -78.86° W), Zona 7 (3.30° N, -78.49° W), Zona 8 (3.65° N, -78.15° W).

en la zona de subducción, entre las placas tectónicas Nazca y Pacífico, paralelos entre sí, en donde se concentra la mayor actividad sísmica de la franja colombo-ecuatoriana. Estos segmentos siguen un mismo patrón en dirección NE. En esta zona es en donde se encuentran los epicentros de los grandes sismos-tsunamis históricos (i.e. 1906, 1942, 1958, 1979). Con base en la distribución espacial de los sismos ocasionados por fallas normales o inversas, con magnitudes $M_w \geq 5.0$ e hipocentros entre 15-70 km ocurridos en el Pacífico colombiano durante los últimos 30 años (Tabla 1), los estudios de sismicidad desarrollados en esta zona (e.g. Beck y Ruff, 1984; Mendoza y Dewey, 1984; Gutscher et al., 1999) y la liberación de energía en la zona de subducción que ha generado sismos y tsunamis en dirección SW-NE (e.g. Collot et al., 2004), se han definido ocho fuentes potenciales de generación de tsunamis para el litoral sur del Pacífico colombiano (Figura 1B).

En cuanto a la magnitud del sismo precursor, a partir de las evaluaciones de las características de los segmentos de subducción de la costa Pacífica colombiana, el Ingeominas concluyó que el segmento cabo Corrientes - Buenaventura se caracteriza por sismos de magnitudes $M_w \sim 7.0$, como el ocurrido el 15 de noviembre de 2004, ya que las zonas de rotura no pueden ser tan grandes como para generar eventos de mayor magnitud. Mientras que el segmento Buenaventura - Esmeraldas (Ecuador) tiene un potencial de generación de sismos de mayor magnitud, como los ocurridos en 1906, 1942, 1958 y 1979, y que fueron precursores de tsunamis (Cardona, 2005). Por lo tanto, se definieron para la zona de interés dos escenarios con magnitudes de $M_w=7.9$ y $M_w = 8.6$ (Tabla 2), que corresponden a la magnitud de los sismos de 1979 y 1906,

Tabla 2. Escenarios sísmicos definidos para la modelación numérica

Parámetros	Escenarios - magnitud	
	No. 1	No. 2
Dislocación (m)	4,5	10,0
Longitud de ruptura (km)	200,0	400,0
Ancho de ruptura (km)	80,0	160,0
Rumbo (°)	23,0	23,0
Ángulo de buzamiento (°)	16,0	16,0
Dirección de buzamiento (°)	118,0	118,0
Profundidad (km)	20,0	20,0
Magnitud (M_w)	7,9	8,6

Nota. El área de ruptura (i.e. longitud y ancho) y la magnitud de la dislocación se calcularon a partir de las relaciones empíricas con M_w propuestas por Wells y Coppersmith (1994).

respectivamente (Guziakov, 2001). Estos eventos han sido los de mayor magnitud registrada hasta ahora en esta área (Mendoza y Dewey, 1984), por lo que se considera que constituyen umbrales apropiados para evaluar la amenaza por tsunami en la bahía de Buenaventura.

Creación de mallas de trabajo

La implementación del modelo numérico requiere información batimétrica y topográfica en el dominio de cálculo (i.e. mallas de trabajo). Se utilizó información de diversas fuentes y escalas de acuerdo con los requerimientos de las mallas de cálculo. Se obtuvo información batimétrica del proyecto ETOPO2 (Smith y Sandwell, 1997) (con resolución espacial de 2' de arco), de cartas náuticas levantadas por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) e información batimétrica de detalle obtenida por el Centro Control de Contaminación del Pacífico (CCCP). La información topográfica fue obtenida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el CCCP.

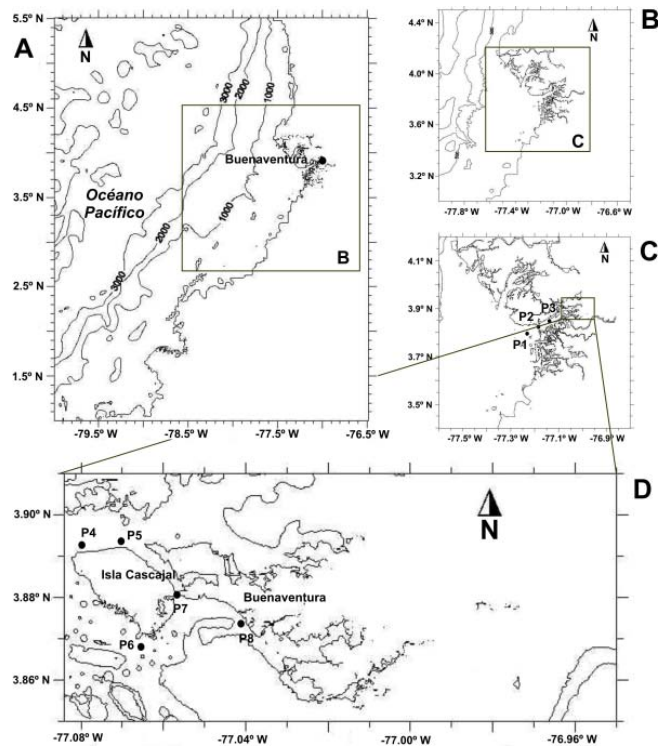


Figura 2. Mallas de trabajo empleadas en la modelación numérica de eventos tsunamigénicos. (A) Malla externa con resolución espacial de 810 m, (B) malla de tránsito numérico con resolución espacial de 270 m, (C) malla de tránsito numérico con resolución espacial de 90 m, (D) malla interna con resolución espacial de 30 m. Se muestran los puntos en donde se obtendrán señales sintéticas de altura de ola.

La estabilidad numérica del modelo y la resolución requerida para establecer los campos de inundación se tuvieron en cuenta para fijar el tamaño de las mallas de cálculo. Con base en la información disponible para la bahía de Buenaventura se seleccionó un ancho de celda de 30 m para la malla interna de detalle (Figura 2D). Se seleccionaron cuatro mallas de cálculo anidadas con un paso diferencial espacial a razón de tres. La malla exterior contiene los puntos de generación de los sismos precursoros (Figura 2A), sobre la malla interior se calcula el campo de inundación a partir de la teoría no lineal de ondas largas (Figura 2D). Las mallas B y C (Figuras 2B y 2C) son de tránsito numérico. Es importante señalar que disponer de este arreglo de mallas anidadas disminuye el tiempo de cálculo ofreciendo buena precisión en los resultados (IUGG/IOC, 1997).

En las mallas de trabajo se situaron ocho puntos para obtener señales sintéticas de altura de ola (Figura 2). Estos puntos se definieron con el fin de evaluar los siguientes aspectos: (i) disipación de la energía de las ondas de tsunami en su tránsito por la bahía de Buenaventura como resultado de las forma de la bahía, el efecto de la línea de costa y las geoformas costeras (i.e. islas, barras, etc.); (ii) observar el comportamiento del tren de oleaje en puntos de interés; y (iii) determinar el tiempo de llegada de las olas de tsunami al casco urbano de Buenaventura. Los puntos P1, P2, P3, P4 y P5 (Figura 2) servirán para evaluar la disipación de energía durante el tránsito de las ondas de tsunami por la bahía. La profundidad de la lámina de agua en estos puntos es similar, por lo que los resultados obtenidos en cada uno de ellos resultan comparables.

Intervalo de cálculo

La resolución espacial entre las mallas varía mientras que el intervalo de cálculo se mantiene constante en todas las mallas, de manera que debe garantizarse la estabilidad numérica. La estabilidad de la solución numérica se garantiza si cada una de las mallas cumple la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) (16),

$$\sqrt{2gh_{\max}} \frac{\Delta x}{\Delta t} \leq 0.8 \quad (16)$$

donde Δt es el paso del tiempo en segundos, Δx es la resolución espacial de la malla, y h_{\max} es la profundidad máxima de la malla. Considerando las características de las mallas de trabajo (Tabla 3), se seleccionó un paso del tiempo de 0.5 s para todos los dominios de cómputo de manera que se garantiza la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) (Tabla 3).

Tabla 3. Características de las mallas de trabajo (h_{\max} , Δx , Δt) y coeficiente de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL).

Mallas de cálculo	h_{\max}	Δx	Δt	CFL
Malla A	4833,80	810	0,5	0,190
Malla B	2236,50	270	0,5	0,387
Malla C	476,40	90	0,5	0,537
Malla D	17,81	30	0,5	0,311

Nota. Δt es el paso del tiempo en segundos, Δx es la resolución espacial de la malla, y h_{\max} es la profundidad máxima de la malla. La h_{\max} se calculó considerando condiciones de marea alta (4.5 m).

Condiciones de marea

Una de las condiciones iniciales del modelo numérico es el nivel de marea, que se mantiene constante durante todo el periodo de cálculo (IUGG/IOC, 1997). Para definir estos niveles se construyó una curva de frecuencias acumuladas a partir de la serie histórica de mareas del mareógrafo de Buenaventura. Una vez construida esta curva, se seleccionaron niveles de 2.5 y 4.5 m para el nivel medio y alto de marea, respectivamente. El nivel medio de marea tiene un ~50% de probabilidad de no excedencia, mientras que el nivel alto de marea presenta ~90% de probabilidad de no excedencia. Estos dos niveles de marea constituyen los dos escenarios de propagación que serán considerados en las modelaciones numéricas.

4. Resultados

Sismo precursor de magnitud $M_w = 7.9$

Para ninguno de los epicentros se generan áreas inundadas en el casco urbano de Buenaventura durante marea media. En la malla interna se alcanzan alturas máximas de ola que varían entre 0.81 y 1.28 m para las zonas 3 y 4, respectivamente (Tabla 4). Sin embargo, ninguno de los campos de inundación generados representa peligro potencial para el casco urbano de Buenaventura. En cuanto al tiempo de arribo del tren de olas a Buenaventura, que en este caso tiene repercusiones en el nivel de amenaza de las zonas rurales, se observa que varía de acuerdo con la localización del sismo precursor. El menor tiempo se presenta en la zona 8 con 56.2 minutos, mientras que el mayor se observa en las zonas 1 y 2 con 90.0 y 91.2 minutos, respectivamente, lo que significa una diferencia de cerca de 34 minutos para estos epicentros.

Los resultados obtenidos durante marea alta son similares a los obtenidos con marea media. Durante marea alta,

para la malla interna se alcanzan alturas máximas de ola que oscilan entre 0.79 y 1.54 para las zonas 1 y 4, respectivamente (Tabla 4). En esta condición de marea tampoco se generan áreas inundadas en el casco urbano de Buenaventura para ninguno de los epicentros de generación. El tren de olas generado desde la zona 8 tarda 56.2 minutos en llegar a Buenaventura, mientras que el tiempo máximo se presenta para las ondas generadas desde las zonas 1 y 2 (85 minutos). En este caso, la diferencia entre los umbrales de tiempo de arribo de tren de oleaje es de cerca de 28 minutos.

Para un sismo de esta magnitud, y considerando los diferentes epicentros evaluados, no se observan diferencias significativas en los resultados obtenidos durante marea media y marea alta. En ninguno de los casos se observan áreas inundadas. Además, aun cuando para la mayoría de los epicentros las alturas máximas de oleaje en la malla interna son mayores durante marea alta, las diferencias no superan los 0.26 m al comparar los resultados durante los dos estados de marea (Tabla 4). La incidencia de la marea puede observarse en el tiempo de arribo de las ondas de tsunami al casco urbano de Buenaventura. Para algunos de los epicentros se observan diferencias hasta de 10 minutos en el tiempo de llegada del tren de oleaje entre los dos estados de marea evaluados.

Los resultados indican que para un sismo de magnitud $M_w=7.9$, ninguno de los casos simulados (i.e. epicentros

de generación, condiciones de marea) representa peligro potencial para el casco urbano de Buenaventura.

Sismo precursor de magnitud $M_w=8.6$

Durante condiciones de marea media se observan áreas inundadas en el casco urbano de Buenaventura para todos los sitios de generación evaluados (Figura 3). En la malla interna se alcanzan alturas máximas de ola que varían entre 4.70 y 6.13 m para las zonas 7 y 1, respectivamente (Tabla 4). El tsunami generado desde la zona 1 produce la mayor proporción de áreas inundadas, particularmente en la isla de Cascajal y en las zonas periféricas del continente (Figura 3A). En cuanto al tiempo de arribo del tren de olas a Buenaventura, se observa que varía de acuerdo con la localización del sismo precursor. El menor tiempo se presenta en la zona 5 con 51.2 minutos, mientras que el mayor se observa en la zona 1 con 75.0 minutos, lo que representa una diferencia de cerca de 24 minutos para estos epicentros.

Los resultados obtenidos durante marea alta difieren ligeramente en comparación a los obtenidos con marea media. Durante marea alta, para la malla interna se alcanzan alturas máximas de ola que oscilan entre 5.32 y 6.26 m para las zonas 2 y 1, respectivamente (Tabla 4). En todos los casos evaluados, la isla de Cascajal, las zonas adyacentes al delta del río Dagua y las riberas del estero San Antonio constituyen las áreas más afectadas (Figura 4). El

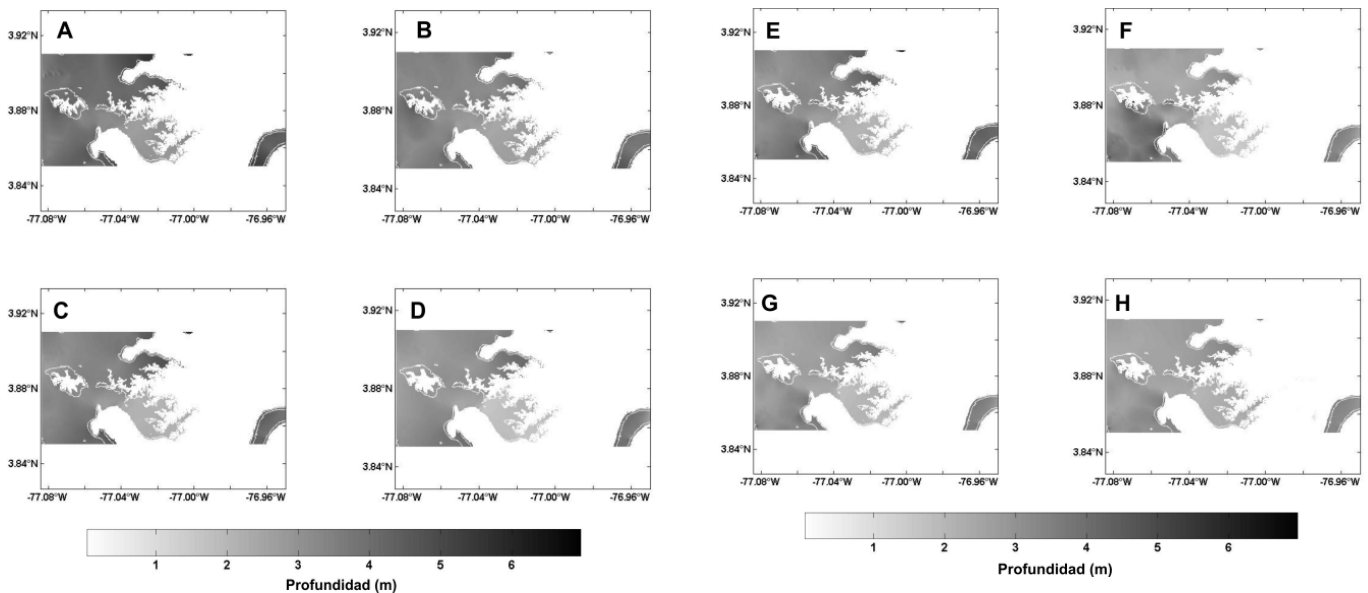


Figura 3. Campos de inundación homogéneos (m) para un tsunami generado por un sismo $M_w=8.6$, durante marea media. Epicentros del sismo precursor: (A) Zona 1, (B) Zona 2, (C) Zona 3, (D) Zona 4, (E) Zona 5, (F) Zona 6, (G) Zona 7, y (H) Zona 8.

Tabla 4. Altura máxima de ola en la malla interna de cálculo (Malla D) para cada uno de los escenarios de simulación numérica (magnitud y epicentro del sismo precursor, estado de marea).

	Altura máxima de ola (m) – malla D							
	Epicentro de generación – sismo precursor							
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
Sismo $M_w=7.9$								
<i>Marea media</i>	0.84	0.82	0.81	1.28	0.98	0.88	0.84	0.98
<i>Marea alta</i>	0.79	0.98	0.97	1.54	0.94	0.90	1.22	1.11
Sismo $M_w=8.6$								
<i>Marea media</i>	6.13	5.33	6.12	5.21	5.86	5.86	4.70	4.79
<i>Marea alta</i>	6.26	5.32	6.15	5.17	6.00	5.53	5.78	5.39

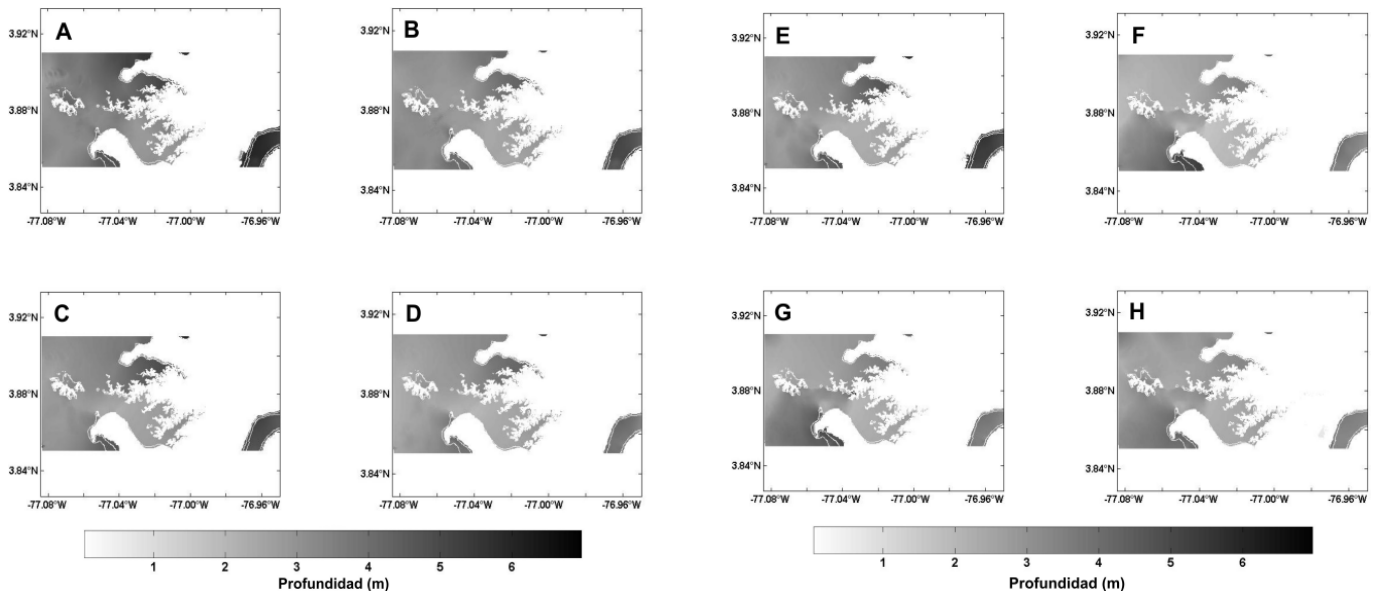


Figura 4. Campos de inundación homogéneos (m) para un tsunami generado por un sismo $M_w=8.6$, durante marea alta. Epicentros del sismo precursor: (A) Zona 1, (B) Zona 2, (C) Zona 3, (D) Zona 4, (E) Zona 5, (F) Zona 6, (G) Zona 7, y (H) Zona 8.

tsunami generado desde la zona 1 produce la mayor proporción de áreas inundadas, con alturas superiores a los 4.0 m en todas las zonas inundadas, particularmente en la isla de Cascajal, en las zonas periféricas del continente, riberas del estero San Antonio y delta del río Dagua (Figura 4A). El tren de olas generado desde la zona 8 tarda 56.2 minutos en llegar a Buenaventura, mientras que el tiempo máximo se presenta para las ondas generadas desde la zona 1 (68.7 minutos). En este caso, la diferencia entre los umbrales de tiempo de arribo de tren de oleaje es de sólo 12 minutos.

Para un sismo de esta magnitud, y considerando los diferentes epicentros evaluados, se observan ligeras diferencias en los resultados obtenidos durante marea media y marea alta. En ambos casos las áreas más afectadas por la inundación coinciden. Sin embargo, la altura de la lámina de agua en las zonas inundadas durante marea alta es mayor en comparación con el nivel observado en condiciones de marea media (Figuras 3 y 4). Aun cuando para la mayoría de zonas de generación consideradas las alturas máximas de oleaje en la malla interna son mayores durante marea alta, las diferen-

cias no superan los 1.08 m al comparar los resultados durante cada uno de los estados de marea (Tabla 4). Para un sismo de esta magnitud, la marea no parece influir en el tiempo de arribo de las ondas de tsunami al casco urbano de Buenaventura. Para algunos de los epicentros prácticamente no existen diferencias (~1 minuto) en el tiempo de llegada del tren de oleaje durante los dos estados de marea evaluados. La mayor diferencia se presenta en la zona 1 con 6.3 minutos.

Los resultados indican que para un sismo de magnitud $M_w=8.6$, todos los casos simulados (i.e. epicentros de generación, condiciones de marea) representan peligro potencial para el casco urbano de Buenaventura, especialmente para la isla de Cascajal, las zonas adyacentes al delta del río Dagua y las riberas del estero San Antonio, que constituyen las áreas más afectadas. Estos resultados señalan que los tsunamis generados desde las zonas 1, 2, y 6 representan los escenarios más desfavorables para el casco urbano de Buenaventura. En este caso, los tsunamis generados desde cada una de las zonas evaluadas generan olas con alturas superiores a 4.6 m sin importar la condición de marea.

Tránsito de la onda de tsunami por la bahía de Buenaventura

La altura de ola en los puntos P1, P2, P3, P4 y P5 sirvió para evaluar la disipación de energía durante el tránsito de las ondas de tsunami por la bahía de Buenaventura (Tabla 5). Se encontró que en todos los casos evaluados la altura de ola disminuye en forma significativa durante su tránsito por la bahía (Tabla 5).

Para un sismo precursor de $M_w=7.9$, durante marea media, en la entrada de bahía (P1) se observan olas entre 0.43 y 0.92 m, mientras que en la isla de Cascajal (P5) se presentan olas con alturas entre 0.27 y 0.45 m (Tabla 5). Durante marea alta las olas en la entrada de la bahía (P1) se caracterizan por tener alturas entre 0.49 y 1.05 m, cuando las ondas de tsunami llegan a la isla de Cascajal (P5) las alturas han descendido hasta 0.22 y 0.42 m (Tabla 5). En ambos casos las reducciones en la altura de ola superan el 40%.

El sismo precursor de $M_w=8.6$, durante marea media, genera alturas de ola de entre 3.64 y 5.47 m en la entrada de bahía (P1), mientras que en la isla de Cascajal (P5) las olas han descendido hasta alcanzar los 2.19 y 3.83 m (Tabla 5). Durante marea alta las olas en la entrada de la bahía (P1) se caracterizan por tener alturas entre 3.80 y 5.35 m, cuando las ondas de tsunami llegan a la isla de Cascajal las alturas descienden hasta llegar a 2.01 y 3.53 m (Tabla 5). En estos casos las reducciones en la altura de ola varían entre el 34% y el 47%.

5. Discusión

La aplicación de un enfoque por escenarios permitió evaluar el efecto del nivel de marea, y el de la localización y magnitud del sismo precursor sobre la generación y propagación de un tsunami en la bahía de Buenaventura. La importancia de la modelación por escenarios radica en que evalúa de manera detallada casos característicos que se consideran representativos de condiciones potenciales de amenaza. Además, produce información relevante relacionada con la interacción del tsunami con la geomorfología costera local, por lo que esta aproximación tiene un impacto significativo en la correcta evaluación de la amenaza por tsunami (Yalçiner et al., 2002; Tinti et al., 2002; Tinti y Armigliato, 2003). Por ejemplo, mediante el análisis de escenarios considerando diferentes mecanismos de falla del sismo precursor, Tinti y Armigliato (2003) mostraron que un sistema peninsular en el oriente de la isla de Sicilia (Italia) actúa como barrera natural frente a un tsunami incidente, disminuyendo de forma significativa la amplitud del oleaje independientemente del mecanismo de falla simulado. A nivel mundial y local, los estudios basados en el enfoque por escenarios han permitido identificar las condiciones de generación y propagación de tsunamis más adversas para un lugar específico (e.g. Papazachos et al., 1985; Tinti y Cavagni, 1995; Meyer y Caicedo, 1998; Fernandez et al., 2000; Cevdet et al., 2002; Yalçiner et al., 2002; Cardona, 2004, 2005; Fernandez et al., 2004; Hebert et al., 2005, Rosales y Meyer, 2007).

La magnitud aparece como el parámetro más determinante al evaluar la amenaza por tsunami en el casco urbano de Buenaventura. La variación de la magnitud del sismo (M_w) genera cambios significativos en las áreas afectadas por inundación, en la altura y tiempo de llegada del tren de olas. Un sismo de $M_w=7.9$ generado desde los epicentros evaluados no produce áreas inundadas en el casco urbano de Buenaventura, mientras un sismo de $M_w=8.6$ afecta a varias zonas del municipio independientemente de la localización del sismo precursor.

El nivel de lámina de agua que genera un sismo de $M_w=8.6$, que supera los 3.0 m en todos los casos de generación, no sólo es peligroso por la extensión del área inundada, sino también por las poderosas corrientes de fondo que suelen generarse en estos casos (Cevdet et al., 2002). Estas corrientes de fondo contribuyen a la formación de fuerzas de empuje y arrastre, generando peligros adicionales para los sistemas expuestos o vulnerables. Por su parte, la altura de ola en la malla interna y en los puntos de observación (i.e. P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8) se

Tabla 5. Altura de ola en puntos de observación (P1, P2, P3, P4, P5), en donde se evalúa el tránsito de las ondas de tsunami por la bahía de Buenaventura bajo diferentes escenarios.

		Altura máxima de ola (m)				
		Puntos de observación				
		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
Sismo $M_w=7.9$						
	<i>Marea media</i>					
	<i>Zona 1</i>	0.734	0.602	0.388	0.290	0.300
	<i>Zona 2</i>	0.484	0.454	0.340	0.270	0.301
	<i>Zona 3</i>	0.803	0.791	0.421	0.334	0.347
	<i>Zona 4</i>	0.899	0.811	0.673	0.517	0.454
	<i>Zona 5</i>	0.662	0.607	0.440	0.306	0.334
	<i>Zona 6</i>	0.437	0.519	0.353	0.288	0.270
	<i>Zona 7</i>	0.790	0.783	0.453	0.364	0.395
	<i>Zona 8</i>	0.924	0.930	0.768	0.457	0.456
	<i>Marea alta</i>					
	<i>Zona 1</i>	0.619	0.524	0.375	0.231	0.229
	<i>Zona 2</i>	0.490	0.484	0.433	0.253	0.246
	<i>Zona 3</i>	0.697	0.674	0.464	0.300	0.290
	<i>Zona 4</i>	0.853	0.814	0.649	0.367	0.354
	<i>Zona 5</i>	0.583	0.609	0.537	0.294	0.282
	<i>Zona 6</i>	0.542	0.536	0.534	0.257	0.263
	<i>Zona 7</i>	0.771	0.617	0.582	0.336	0.340
	<i>Zona 8</i>	1.051	0.897	0.748	0.416	0.428
Sismo $M_w=8.6$						
	<i>Marea media</i>					
	<i>Zona 1</i>	5.47	5.16	4.73	3.68	3.83
	<i>Zona 2</i>	4.33	4.53	3.96	3.24	3.17
	<i>Zona 3</i>	4.32	4.77	4.24	2.83	2.91
	<i>Zona 4</i>	3.80	3.93	3.33	2.53	2.61
	<i>Zona 5</i>	4.56	4.44	3.85	2.71	2.75
	<i>Zona 6</i>	4.12	3.45	2.93	2.10	2.19
	<i>Zona 7</i>	3.68	3.26	2.52	2.31	2.38
	<i>Zona 8</i>	3.64	3.39	2.60	2.36	2.36
	<i>Marea alta</i>					
	<i>Zona 1</i>	5.35	4.30	4.85	2.69	3.53
	<i>Zona 2</i>	4.27	3.42	4.04	2.66	2.79
	<i>Zona 3</i>	4.29	3.59	4.44	2.67	2.68
	<i>Zona 4</i>	3.80	3.27	3.60	2.34	2.36
	<i>Zona 5</i>	4.53	3.57	4.21	2.51	2.50
	<i>Zona 6</i>	3.93	3.04	2.87	1.92	2.01
	<i>Zona 7</i>	4.22	3.17	2.51	2.18	2.22
	<i>Zona 8</i>	4.57	3.25	2.97	2.19	2.58

incrementa cerca de cuatro veces cuando la magnitud del sismo precursor aumenta de $M_w=7.9$ a $M_w=8.6$.

Los resultados de este trabajo coinciden parcialmente con lo encontrado previamente por **Caballero y Ortiz** (2002), quienes evaluaron el impacto de un tsunami sobre Buenaventura considerando un sismo de $M_w=8.2$ con origen en $78.8^\circ W - 3.5^\circ N$ (cercano a la Zona 3 definida

en este estudio). Estos autores señalan que el sector sur de la isla de Cascajal es la zona más afectada, mientras que el presente estudio indica que el sector nor-occidental de esta isla constituye el área de mayor vulnerabilidad. Por su parte, **Rosales y Meyer** (2007) evaluaron un tsunami generado por un sismo con origen en $78.3^\circ W - 3.5^\circ N$ (Zona 3) y magnitudes de $M_w=8.0$ y 8.1 , encontrando alturas máximas de ola en la isla de Cascajal del orden de

1.5 – 2.0 m. Estos resultados son comparables a los encontrados en este estudio para un sismo precursor de $M_w=7.9$ (Tabla 4). La diferencia entre estos tres estudios radica, principalmente, en la información batimétrica y topográfica de la malla de detalle. El presente trabajo utiliza una mayor resolución espacial, con una malla de detalle de 30 m. La profundidad del mar y la altura del terreno son variables básicas dentro del proceso de modelamiento numérico de tsunamis, por lo que la validez de los resultados obtenidos está relacionada directamente con la calidad, precisión y exactitud de esta información. Por lo tanto, para producir resultados definitivos sobre el nivel de amenaza en el municipio de Buenaventura, zona urbana y rural, es preciso obtener información batimétrica y topográfica de mayor resolución espacial.

Algunos estudios han encontrado relaciones cuantitativas y cualitativas entre la altura de ola de un tsunami y el epicentro del sismo precursor (expresado como distancia del sismo al lugar de interés) (e.g. **Papazachos et al.**, 1985; **Cevdet et al.**, 2002). Por ejemplo, a partir de un análisis sistemático de tsunamis en el mar Egeo, **Papazachos et al.** (1985) establecieron una relación inversamente proporcional entre la altura de ola de un tsunami y la distancia del sismo precursor con relación a un área de interés. El presente estudio no mostró una relación de este tipo para los casos evaluados. Sólo para los casos de tsunamis generados por un sismo de $M_w=7.9$ se observan las mayores altura de ola en tsunamis originados desde la zona 8 (la más cercana a la población de Buenaventura). Sin embargo, los mayores efectos adversos (i.e. altura de lámina de agua, áreas inundadas y altura máxima de ola) se presentaron para un tsunami generado por un sismo de $M_w=8.6$ con origen en la zona 1, la más alejada del municipio de Buenaventura.

Los resultados obtenidos sugieren que para los casos evaluados, especialmente para aquellos de magnitud $M_w=8.6$, el ángulo de incidencia y la evolución del tren de olas con respecto a la entrada a la bahía Buenaventura (y por ende la posición de la falla sísmica) tienen mayor relevancia sobre los efectos adversos de un tsunami que la localización del sismo precursor. Algunos autores señalan que la posición y ubicación de la falla sísmica con relación a la zona evaluada tiene mayor incidencia que la distancia al sismo precursor en los daños ocasionados por un tsunami (e.g. **Hébert et al.**, 2005; **Tinti y Armigliato**, 2003). La incidencia de estos parámetros (ángulo de incidencia y la evolución del tren de olas) sobre los daños potenciales de un tsunami debe ser analizada con mayor detalle en el litoral Pacífico colombiano.

Al contrario de lo indicado por trabajos anteriores realizados en el litoral Pacífico colombiano (e.g. **Caballero y Ortiz**, 2002; **Cardona**, 2004), la condición de marea no mostró un efecto determinante sobre los daños ocasionados por un tsunami. Mientras que **Caballero y Ortiz** (2002) encontraron diferencias de ~4.0 m para la lámina de agua generada durante marea alta y marea media (sismo precursor de $M_w=8.2$), las diferencias obtenidas en este estudio no superan los 1.1 m entre los dos estados de marea evaluados (sismo precursor de $M_w=7.9$ y 8.6). Hasta ahora no existe una explicación consistente sobre este fenómeno, sin embargo podría estar relacionado con fenómenos de reflexión y refracción de oleaje causados por la forma estrecha y cerrada de la bahía, lo que ocasionaría el incremento en la amplitud del oleaje y haría difícil evaluar en forma directa el efecto de la marea (e.g. **Tappin et al.**, 2001).

Además de inducir fenómenos de reflexión y refracción de oleaje, la línea de costa y las formas costeras tienen un papel decisivo en la reducción de la energía de las ondas de un tsunami (**Tinti y Cavagni**, 1995; **Tinti y Armigliato**, 2003). Los resultados de este estudio muestran que las ondas de tsunami reducen sensiblemente su amplitud en su tránsito por la bahía de Buenaventura, independientemente de la magnitud del sismo precursor, localización o estado de marea. Un mayor conocimiento de la configuración morfológica y batimétrica del área de estudio, permitiría evaluar en forma precisa el efecto de las geoformas costeras en la evolución de ondas de tsunami.

6. Conclusiones

La ejecución de este proyecto beneficiará en el mediano plazo a la población vulnerable de las áreas evaluadas, ya que los resultados obtenidos servirán como soporte técnico para el diseño, desarrollo e implementación del plan local de contingencia para tsunami en el municipio de Buenaventura. En el mismo sentido, al existir una cuantificación de los efectos potenciales de un tsunami sobre la bahía de Buenaventura (considerando diferentes escenarios) el proyecto sustentará el proceso de toma de decisiones de las instituciones del orden local, regional y nacional (e.g. Alcaldía, CLOPAD, Defensa Civil, Cruz Roja, DGPAD, etc.) encargadas de la elaboración y ejecución de dicho plan.

En el caso de la bahía de Buenaventura, la morfometría de la línea de costa reduce los efectos adversos de un tsunami. Aun cuando se encontró que un sismo $M_w=8.6$ puede generar olas de tsunami con alturas hasta de cuatro y

seis metros, durante el tránsito por la bahía de Buenaventura las olas pierden gran parte de su energía y su altura disminuye considerablemente. En otras zonas del municipio de Buenaventura, expuestas en forma directa a la energía de las ondas de tsunami, se estima que sismos $M_w = 8.0$ pueden ser potencialmente desastrosos dependiendo del epicentro del sismo y las condiciones de marea.

En el caso específico del casco urbano del municipio de Buenaventura y considerando los parámetros analizados, la isla de Cascajal y las riberas del estero San Antonio constituyen las áreas más afectadas en cualquiera de los escenarios evaluados. Durante un tsunami ocasionado por un sismo de $M_w = 7.9$ y en condiciones de marea alta el sector norte de la isla de Cascajal es inundado por completo. Mientras que para un tsunami generado por un sismo de $M_w = 8.6$, independientemente de las condiciones de marea y el epicentro del sismo, se encontró que más del 70% de la isla sufre inundaciones. Este resultado es de gran importancia si se tiene en cuenta que en la isla de Cascajal se concentra la infraestructura municipal, portuaria, comercial y turística del municipio de Buenaventura.

Los resultados indican que la condición de marea es una circunstancia secundaria al momento de evaluar los efectos adversos de un tsunami en la zona de Buenaventura. Si se consideran tsunamis generados por sismos de igual magnitud y epicentro, se observa que el área afectada por inundación no es significativamente diferente durante condiciones de marea alta y marea media.

La profundidad del mar y la altura del terreno son variables básicas dentro del proceso de modelamiento numérico de tsunamis, por lo que la validez de los resultados obtenidos está relacionada directamente con la calidad, precisión y exactitud de esta información. La ausencia de información batimétrica y topográfica detallada y actualizada de la zona de interés fue la única limitante en el desarrollo de este proyecto. Esta situación impide obtener resultados definitivos y de mayor detalle. Por lo tanto, los resultados de este proyecto deben tomarse como indicativos y preliminares pues requieren una mayor refinación y procesamiento. Para evaluar la amenaza en las zonas rurales también es imprescindible obtener información batimétrica y topográfica actualizada.

Aun cuando los resultados de este proyecto deben considerarse como preliminares, es importante precisar que se obtuvieron hallazgos significativos: (1) el nivel de vulnerabilidad de la isla de Cascajal, en donde se encuentra ubicada la infraestructura de mayor importancia para el municipio; y (2) las áreas más expuestas de la bahía, zonas rurales del municipio, pueden sufrir inun-

daciones durante un tsunami generado por un sismo de $M_w = 7.9$, dependiendo del epicentro del sismo y las condiciones de marea. Esta información puede poner ser útil para las autoridades locales y ser el punto de partida para adoptar medidas orientadas a la protección de la población e infraestructura expuesta. Para lograr el impacto esperado, debe adelantarse un proceso de divulgación y socialización efectivo y amplio en el que se resalte la importancia de los elementos técnicos en la toma de decisiones político-administrativas.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Dirección General Marítima (DIMAR) por el apoyo institucional, logístico y financiero brindado para el desarrollo de este estudio. De igual forma agradecen al personal que conforma el Grupo de Modelado Integral de Zonas Costeras por su apoyo permanente en el desarrollo del proyecto "Evaluación del Impacto de un Tsunami sobre las costas del litoral Pacífico colombiano", en particular al grupo de levantamientos.

Bibliografía

- Beck, S., Ruff, L.**, 1984. The rupture process of the great 1979 Colombia earthquake: evidence for the asperity model. *Journal of Geophysical Research*. **89**, 9281-9291.
- Caballero, L., Ortíz, M.**, 2002. Evaluación del impacto de tsunamis en el litoral Pacífico colombiano. Parte II (región de Buenaventura). *Boletín Científico CCCP*. **9**, 37-46.
- Caicedo, J., Martinelli, B., Meyer, H., Reyna, J.**, 1996. Numeric simulations of tsunami propagation in the Colombian Pacific coast. *Seismological Observatory of the Southwest, OSSO*. Cali.
- Caicedo, J., Martinelli, B., Meyer, H., Steer, R.**, 1997. Efecto de tsunamis del mar Caribe en la costa colombiana. *Observatorio Sismológico del Suroccidente*. Cali.
- Cardona, Y.**, 2004. Análisis del arribo de ondas de tsunami a las poblaciones de la bahía de Tumaco a través de señales sintéticas. *Boletín Científico del CCCP*. **11**, 73-85.
- Cardona, Y.**, 2005. Modelación de tsunamis en la costa Pacífica colombiana, caso de aplicación bahía de Tumaco. Tesis de maestría en Ingeniería – Recursos hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.
- Cevdet, A., Alpar, B., Altýnok, Y., Özbay, I., Imamura, F.**, 2002. Tsunamis in the Sea of Marmara: Historical documents for the past, models for the future. *Marine Geology*. **190**, 445-463.
- Collot, J-Y., Marcaillou, B., Sage, F., Michaud, F., Agudelo, W., Charvis, P., Graindorge, D., Gutscher, M., Spence, G.**, 2004. Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador-southwest Colombia margin. *Journal of Geophysical Research*. **109**, B1103.

- Fernández, M., Ortíz, M., Mora, R.,** 2004. Tsunami Hazards in El Salvador. Geological Society of America. Special Paper. 375, 435-444.
- Fernández, M., Molina, E., Havskov, J., Atakan, K.,** 2000. Tsunamis and tsunami hazards in Central América. *Natural Hazards*. 22, 91-116.
- Goto, C., Ogawa, Y.,** 1997. Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. IUGG/IOC TIME Project. Unesco. 28 p.
- Goto, C., Ogawa, Shuto, N., Imamura, F.,** 1997. IUGG/IOC TIME Project: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme, Intergovernmental Oceanographic Comision of UNESCO, Manuals and Guide No. 35, París, Francia, pp. 38.
- Gusiakov, V., K.,** 2001. Basics Pacific tsunamis catalog and database, 47 BC-2000 AD: results of the first stage of the project. Proceedings of the International Tsunami Symposium, August 7-9, 2001, Seattle, USA, PMEL/NOAA, pp 263-272.
- Gusiakov, V., K.,** 2005. Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific. *Marine Geology*. 215, 3-9.
- Gutscher, M-A., Malavieille, J., Lallemand, S., Collot, J.,** 1999. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*. 168, 255-270.
- Harvard University,** 2005. Harvard Seismology-Harvard CMT Catalog. <http://www.seismology.harvard.edu>
- Hébert, H., Schindelé, F., Altinok, Y., Alpar, B., Gazioglu, C.,** 2005. Tsunami hazard in the Marmara Sea (Turkey): a numerical approach to discuss active faulting and impact on the Istanbul coastal areas. *Marine Geology*. 215, 23-43.
- IUGG/IOC,** 1997. IUGG/IOC Time Project IOC Manuals and Guides No. 35. Numerical method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. París, Unesco. 101 p.
- Mansinha, L., Smylie, D.,** 1971. The displacement fields of inclined faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 61, 1433-1440.
- McSaveney, M., Goff, J., Darby, D., Goldsmith, P., Barnett, A., Elliott, S., Nongkas, M.,** 2000. The 17 July tsunami: Papua New Guinea: evidence and initial interpretation. *Marine Geology*. 170, 81-92.
- Mendoza, C., Dewey, J.,** 1984. Seismicity associated with the great Colombia-Ecuador earthquakes of 1942, 1958, and 1979: implications for barrier models of earthquake rupture. *Bulletin of the seismological society of America*. 74, 577-593.
- Meyer, H., Caicedo, H.,** 1998. Evaluation of tsunami source scenarios in the Caribbean sea and simulation of wave heights – a TIME project activity. Okushiri Tsunami/UJNR Workshop 1998.
- Papazachos, B., Koutitas, Ch., Hatzidimitriou, P., Karacostas, B., Papaioannou, Ch.,** 1985. Source and short-distance propagation of the July 9, 1956 southern Aegean tsunami. *Marine Geology*. 65, 343-351.
- Quiceno, A.,** 2000. Proyecto evaluación del impacto de un tsunami sobre la zona costera de Tumaco por medio de la modelación matemática. Reporte técnico. Centro Control de Contaminación del Pacífico. Tumaco.
- Quiceno, A., Ortiz, M.,** 2001. Evaluación del impacto de un tsunami en el litoral Pacífico colombiano (región de Tumaco). *Boletín Científico CCCP*. 8, 5-14.
- Ramírez, J., Goberna, J.,** 1980. Terremotos colombianos: noviembre 23 y diciembre 12 de 1979 – Informe preliminar. Reporte Técnico. Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana. Bogotá. 95 p.
- Rosales, C., Meyer, H.,** 2007. Tsunami Scenarios for Buenaventura, Colombia. Sixth International Tsunami Workshop: new insights in tsunami research and tsunami preparedness, warning and mitigation. INOCAR-IUGG/TC-UNESCO IOC-ICG/PTWS. Guayaquil, Ecuador. September 14 – 15th. 2007.
- Smith, W., Sandwell, D.,** 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*. 277, 1956-1962.
- Steketee, J.,** 1958. Some geophysical applications of the elasticity theory of dislocation. *Con. J. Phys.* 95, 1165.
- Tappin, D., Watts, P., McMurtry, G., Lafoy Y., Matsumoto, T.,** 2001. The Sissano, Papua New Guinea tsunami of July 1998 — offshore evidence on the source mechanism. *Marine Geology*, 175, 1-23.
- Tinti, S.,** 1991. Assessment of tsunami hazard in the Italian seas. *Sci. Tsunami Hazards*. 9, 5-14.
- Tinti, S., Gavagni, I.,** 1995. A smoothing algorithm to enhance finite-element tsunami modelling: an application to 5 February 1783 Calabrian case, Italy. *Natural Hazards*. 12, 161-197.
- Tinti, S., Armigliato, A.,** 2003. The use of scenarios to evaluate the tsunami impact in southern Italy. *Marine Geology*, 199, 221-243.
- Tinti, S., Armigliato, A., Pagnoni, G.,** 2002. Tsunami hazard related to the occurrence of large earthquakes along the coasts of Calabria and Sicilia (southern Italy). Abstracts European Seismological Commission (ESC) XXVIII General Assembly, Genoa, 1-6 September 2000, p. 87.
- Tinti, S., Maramai, A., Favali, P.,** 1995. The Gargajo promontory an important seismogenic-tsunamigenic area. *Marine Geology*. 122, 227-241.
- Titov, V., Synolakis, C.,** 1996. Numerical modeling of tidal wave runup. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering*. 124 (4) 157-171.
- United States Geological Service,** 2005. USGS Earthquake Hazards Program: NEIC. <http://eqint.cr.usgs.gov/neic>
- Wells, D., Coppersmith, K.,** 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacements. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 974-1002.
- Yalçiner, A.C., Alpar, B., Altinok, Y., Özbay, I., Imamura, F.,** 2002. Tsunamis in the Sea of Marmara: historical documents for the past, models for the future. *Marine Geology*. 190, 445-463.

Recibido: marzo 8 de 2007

Aceptado para su publicación: septiembre 14 de 2007

CONTRIBUCIÓN AL ANÁLISIS MACROSÍSMICO DEL TERREMOTO DEL 7 DE JUNIO DE 1925: PRINCIPALES EFECTOS EN LA CIUDAD DE CALI

Por

Elkin de Jesús Salcedo Hurtado¹, Mario Diego Romero Vergara²,
María Alexandra Vallejo Chocué³

Resumen

Salcedo Hurtado, E. de J., M. D. Romero Vergara & M. A. Vallejo Chocué: Contribución al análisis macrosísmico del terremoto del 7 de junio de 1925: principales efectos en la ciudad de Cali. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 379-394, 2007. ISSN 0370-3908.

Uno de los terremotos históricos importantes ocurridos en Colombia tuvo lugar el 7 de junio de 1925. A pesar de figurar en el catálogo sísmico mundial con magnitud de 6.75 (Gutenberg y Richter, 1954) y haber causado daños relevantes en la ciudad de Cali y otros centros urbanos del suroccidente, no ha sido objeto de suficientes investigaciones macrosísmicas. Recientemente, varios investigadores han realizado algunos estudios de relocalización instrumental que intentan evaluar su posible fuente sismogénica, sin que este problema se haya resuelto definitivamente.

El presente trabajo, como contribución macrosísmica, utiliza fuentes documentales (archivos históricos, prensa y bibliografía) para describir los principales efectos en diferentes poblaciones, especialmente en la ciudad de Cali, donde se elabora un mapa de localización de la zona con mayores daños. En términos de la escala EMS-98 se evalúa la intensidad macrosísmica y el factor de calidad (Q) para cada lugar, mostrándose también el respectivo mapa de intensidades. Cabe anotar que la información procesada aún no permite elaborar un mapa de isosistas confiable, ni establecer con precisión parámetros como la intensidad epicentral, el epicentro macrosísmico, la profundidad y la relación de atenuación, dejándose abierta una ventana de investigación macrosísmica más profunda acerca de este terremoto.

Palabras clave: terremoto, fuentes documentales, intensidad, Cali, mapa de intensidades.

Abstract

One of the most important historical earthquakes happened in Colombia took place in June 7th

¹ Departamento de Geografía, Universidad del Valle. A. A. 25360. Ciudad universitaria. Cali – Colombia.

² Departamento de Historia, Universidad del Valle. A. A. 25360. Ciudad universitaria. Cali – Colombia.

³ Licenciada en Ciencias Sociales, Universidad del Valle.

1925. In spite of being catalogue with magnitude M 6.75 (Gutenberg and Richter, 1954) and to have caused outstanding damages in Cali and other urban centers of the suroccidente region, it has not been object of enough macroseismical investigations. Recently, several investigators have carried out some studies of instrumental relocation that try to evaluate its possible source, without this problem has been solved definitively.

The present work, as macroseismical contribution, uses documental sources (historical archives, newspaper and bibliography) to describe the main effects in different populations, especially in Cali, where a map of localization of the area with more damages is elaborated. In terms of the scale EMS-98 is evaluated the macroseismical intensity and the factor of quality (Q) for each place, being also shown the respective intensity map. It is necessary to write down that the processed information not yet allows elaborate a reliable isoseimal map, neither to establish accurately parameters like epicentral intensity, macroseismical epicentre, depth and the attenuation relationship, leaving open a window of deeper macroseismical investigation about this earthquake.

Key words: earthquake, documental sources, intensity, Cali, map of intensities.

1. Introducción

Las observaciones instrumentales de los terremotos en Colombia comienzan en el año 1923 cuando, al crearse el Observatorio Meteorológico Colombiano, el Padre Simón Sarasola instaló el primer sismógrafo (Ramírez, 1948). Después de la creación del Instituto Geofísico de los Andes, en el año 1941 (Goberna, 1983), y la realización del año geofísico internacional se logra la ampliación de la red sismológica, estimulándose la investigación sismológica en el país. Con la instalación de la Red Sismológica Nacional (RSNC) en el año 1992 se obtiene mayor cobertura espacial y del umbral de detección de magnitudes de los sismos (Escallón, et al., 1993).

Los sismos más importantes en Colombia han tenido lugar en el periodo preinstrumental (Espinosa et al., 2004), de manera que para los estudios de la amenaza y el riesgo sísmico éstos constituyen el principal referente de observación. Uno de estos terremotos importantes tuvo lugar el 7 de Junio de 1925. Sobre este evento existen registros instrumentales de estaciones de los Estados Unidos y de algunos países de Europa (Mendoza et al., 2004). Se tiene información periodística y bibliográfica que describen los efectos y daños causados por el terremoto en algunas poblaciones del suroccidente y centro de Colombia.

Por el nivel de daños que hoy se conoce fueron causados por este terremoto, se esperarían encontrar en la literatura numerosos o detallados trabajos de sismicidad histórica dedicados a su estudio. Sin embargo, llama la atención que en el libro de Ramírez (Ramírez, 1975), principal obra de estudio de sismicidad histórica en Colombia, no se describan los daños y efectos del sismo.

Este trabajo amplía el nivel de conocimiento sobre este evento. Presenta interesantes datos sobre los daños en las poblaciones afectadas y, a manera de “árbol genealógico

investigativo”, describe los diferentes estudios realizados reflejando el estado del arte y del conocimiento del terremoto. La búsqueda de información se llevó a cabo en archivos y bibliotecas siguiendo el método intensivista, para lo cual se elaboraron fichas bibliográficas (apéndice 1) y de resumen de efectos – FRET – (apéndice 2), que facilitaron la labor de interpretación de datos. Usando la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98) se evaluó la intensidad en cada población y se elaboró el mapa de intensidades. También se describen los daños en la ciudad de Cali y, mediante un mapa, se muestra la zona más afectada. La información hasta ahora recolectada no permite la evaluación de parámetros macrosísmicos como la intensidad epicentral, el epicentro y la profundidad, entre otros.

2. Antecedentes

El terremoto del 7 de Junio de 1925 tuvo lugar en el suroccidente colombiano. Según fuentes primarias escritas ocurrió a las 18:45 hora local (Periódico El Relator, 1925), afectando varias poblaciones del departamento del Valle del Cauca y siendo sentido en el centro del país. La Figura 1 presenta el árbol simplificado (“árbol genealógico investigativo”), a partir del cual se puede establecer el estado del arte y los diferentes aportes hasta ahora hechos desde los estudios instrumentales y macrosísmicos.

2.1. Estudios e información instrumental

Según Gutenberg and Richter (1954), el terremoto ocurrió a las 23:41:42 tiempo universal, localizándose en el Océano Pacífico en las coordenadas 3.0° latitud norte y 78.0° de longitud oeste, a una profundidad de 170 Km., con magnitud de 6,8. Posteriormente Engdahl and Villaseñor (2002, en Mendoza et al., 2004) lo relocalizaron en cercanías de la ciudad de Tulúa en las coordenadas 4,02° norte y 76,07° oeste a una profundidad de 33 Km.

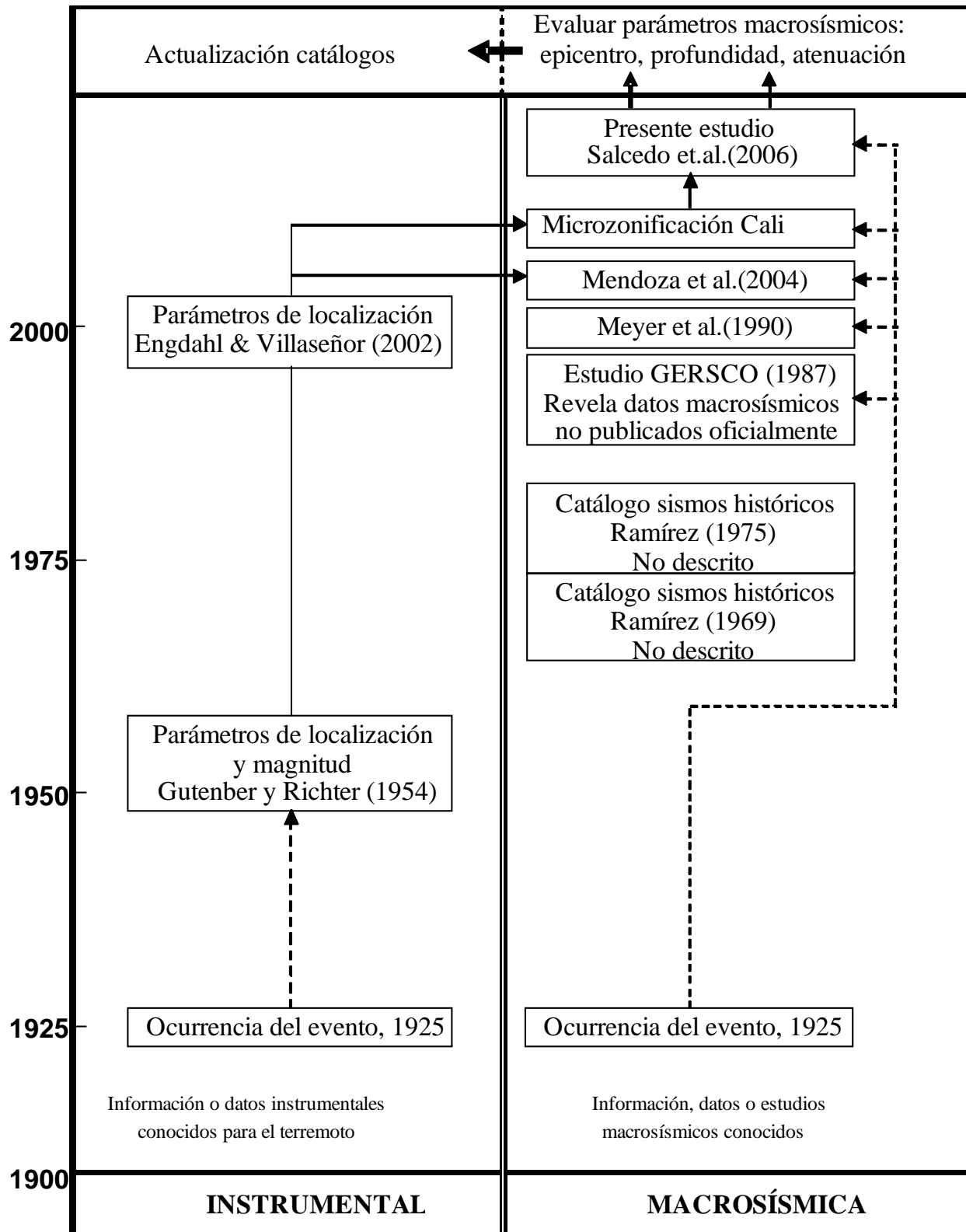


Figura 1. Árbol simplificado de seguimiento de estudios sobre el terremoto del 7 de Junio de 1925 en Colombia.

2.2. Aporte y datos macrosísmicos

En el estudio desarrollado por el Grupo de Estudio de Riesgo Sísmico en el Suroccidente Colombiano (**GERSCO**, 1987), se muestran algunos efectos causados por el terremoto del 7 de junio de 1925 en varias poblaciones del departamento del Valle, incluida la ciudad de Cali; sin embargo, este informe no fue publicado oficialmente, quedando sólo como documento de trabajo para el proyecto.

Por su parte, **Meyer et al.**, (1990, en **Mendoza et al.**, 2004) analizando algunos datos macrosísmicos y teniendo en cuenta patrones y tendencias de otros eventos sísmicos bien localizados instrumentalmente, proponen que el epicentro estuvo localizado al norte de Cali y tuvo su origen en la zona de Wadatti-Benioff, cambiando la localización formulada por Engdahl and Villaseñor que lo atribuyen a una fuente cortical en el continente.

Usando la información recopilada por el Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO) **Mendoza et al.**, (2004) señalan que los daños causados por este evento estuvieron concentrados en poblaciones del Valle del Cauca y en otras pocas de la parte central del país, con lo cual elaboran un mapa de isosistas con sólo tres isólinas. En dicho mapa la isólinea de mayor intensidad tiene valor de VII en la escala de Mercalli Modificada. De esta forma ratifican la localización del epicentro al norte de Cali, como lo hicieron **Meyer et al.**, (1990).

Dentro del estudio de sismicidad histórica de la ciudad de Cali, realizado para el proyecto de Microzonificación sísmica (**Salcedo et al.**, 2004), se revisaron fuentes primarias y secundarias que permitieron, por un lado, la ponderación de daños y efectos causados en edificaciones de esta ciudad y en poblaciones vecinas y, por el otro, la elaboración del respectivo mapa de intensidades. Dicho estudio ha servido de base para el presente artículo.

3. Contexto histórico de la ciudad de Cali

Hacia comienzos del siglo XX la ciudad de Santiago de Cali tenía una apariencia de un poblado cuya estructura de servicios públicos y vías de comunicación apenas cubría zonas céntricas de unos pocos barrios que albergaban a comerciantes, artesanos y trabajadores de manufacturas secundarias, que atendían algunas necesidades de consumo interno.

Los vínculos y relaciones eran establecidos desde Cali con sus antiguas zonas vecinas de Popayán, al sur. Con el norte su relación era con la provincia de Palmira y el territorio de colonización antioqueña hasta con el eje cafete-

ro. Hacia el occidente, la comunicación se establecía con el puerto de Buenaventura a través del antiguo camino de Dagua y desde 1915 la comunicación era más fluida y rápida a través del Ferrocarril del Pacífico. Así, sus poblados cercanos le daban a Cali una dinámica comercial sin precedentes. La zona cafetera del norte del Valle surtía entonces el mercado internacional con el grano a través de Cali, y la producción agrícola del centro y sur del Valle del Cauca surtía de alimentos a la ciudad.

La construcción del canal de Panamá, en 1914, había facilitado estos mercados de los productos regionales del Valle del Cauca por el puerto de Buenaventura. Un crecimiento del comercio y la producción agropecuaria en el Valle había estimulado también la inmigración de población de los entornos rurales hacia la ciudad. El espacio urbano fue creciendo y las necesidades de ampliación de la cobertura de servicios hizo de Cali una urbe moderna y amplia. Con una población aproximada de 13.765 habitantes en 1910; y 57.306 en 1928 en su casco urbano, la ciudad se expandió hacia el oriente y en el occidente hacia la ladera. Otro fuente señala que en 1925, fecha de ocurrencia del terremoto, se contaba con una población aproximada de 60.350 habitantes (**Jiménez y Bonilla**, 2000).

El mayor poblamiento impulsado por inmigrantes de la costa pacífica, de la zona cafetera y del sur del país (Cauca y Nariño) quizás lo tuvo el centro de la ciudad. Casas comerciales, locales de artesanos, calles adoquinadas y pavimentadas, alumbrado eléctrico, y nuevos edificios daban lugar a un centro de ciudad moderno. La plaza central que tenía múltiples usos, desde el mercado, pulperías móviles, sacrificio del ganado y hasta festivales, dio lugar a una plaza abierta para actos sociales. Con una plaza limpia y calles pavimentadas, con buenos alumbrados públicos y alcantarillados subterráneos, el centro de la ciudad fue ampliando su infraestructura. El número de viviendas acumuladas pasó de 3.185 en 1922 a 5.302 en 1928, es decir que en cinco años se construyeron 2.177 viviendas, cifra superior a las acumuladas durante toda la historia de Cali hasta 1915 año en el cual el número de viviendas era de 1.553 (**Vásquez**, 2001).

El viejo centro del casco urbano se amplió hacia el norte y occidental en el sector del Barrio El Peñón y Granada; al sur se construyó el barrio San Fernando; mientras que un poblamiento popular se dio hacia la ladera de San Antonio, San Cayetano y Libertadores; y en el sur occidente se ampliaron los sectores populares de El Calvario, Santa Rosa, San Bosco y La Sardinera. Los materiales utilizados en las construcciones de estos barrios se iban correspondiendo con la estratificación económica de ellos.

La madera y el bahareque fueron los materiales más usados en las edificaciones de los barrios populares; mientras que los materiales de cemento y ladrillos de barro cocido lo fueron en las edificaciones de estrato alto. La Tabla 1, muestra el área construida en la ciudad de Cali en el periodo entre 1922 a 1929.

Como se puede observar, en 1925 se dio un aceleramiento de la actividad constructora en la ciudad. Esta construcción estaba acompañada de fábricas de ladrillos y tejares, la fábrica de cementos y la acería que producía hierro en varillas y aceros, así como puntillas y alambres. Así, los edificios de tres y cuatro pisos comenzaron a distinguir un centro moderno y cosmopolita. Desde 1919 se había dado inicio a las obras de construcción del teatro Municipal, que solo fue terminado en 1927. Nuevos edificios de oficinas para abogados y empresas comerciales (importadoras y exportadoras), acompañaron el paisaje de las antiguas construcciones de “casonas” coloniales y decimonónicas, así como de las antiguas capillas y la catedral. El uso de materiales de cemento y hierro le dieron textura fuerte y algo resistente a las nuevas construcciones, aunque el bahareque y el adobe de las antiguas daban un aspecto híbrido de la modernidad y la arquitectura colonial y del siglo XIX.

Para la época no existían normas de sismo resistencia, y los anteriores sismos sentidos en la ciudad no alcanzaban a dar cuenta de grandes desastres en sus construcciones ni en la población. Sin embargo, el sismo del 7 de junio de 1925 fue un examen de resistencia al cual apenas se sostuvieron algunas construcciones en pie, mientras que otras sufrieron severos daños.

Tabla 1. Área construida por año en la ciudad de Cali, periodo entre 1922 - 1929

Año	Área construida (metros cuadrados)	Tasa de Crecimiento Anual	Índice construcción
1922	16.172	-	100.0
1923	19.074	17.9%	117.9
1924	20.795	9.0%	128.6
1925	35.444	70.4%	219.2
1926	64.371	82.6%	400.3
1927	129.658	100.5%	801.7
1928	160.454	23.7%	992.2
1929	68.939	57.1%	426.3

Fuente: Ocampo, José Antonio (1986).

4. Metodología

En este estudio se aplica el método Intensivista; es decir, que partiendo del conocimiento básico acerca de la existencia del sismo se realiza la búsqueda sistemática de publicaciones periódicas, libros y documentos de archivos que conduzcan a adquirir mayor cantidad de datos posibles sobre la cronología, área de percepción y la fenomenología del evento. Se trata de un trabajo interdisciplinario donde cada profesional, siguiendo el esquema mostrado en la Figura 2, tiene participación tanto en la búsqueda de información como en el proceso de interpretación. La lectura de los documentos logrados arroja como resultado que la mayor cantidad de datos sobre el terremoto del 25 de Junio de 1925 proviene de fuentes primarias, encontrándose también información importante en fuentes secundarias, que especialmente se relacionan con el procesamiento de datos instrumentales.

4.1. Fuentes documentales

La búsqueda de información se llevó a cabo en archivos, bibliotecas, hemerotecas, librerías y centros de documentación. Así, la información revisada de fuentes primarias y secundarias se puede clasificar como fuentes de archivo y fuentes bibliográficas e impresas.

4.1.1. Fuentes de Archivos

La información obtenida de los archivos es muy valiosa y de alta credibilidad puesto que generalmente corresponde a escritos o relatos de testigos oculares. En la búsqueda de esta información se visitó el Archivo General de la Nación, en la ciudad de Bogotá; el Archivo Central del Cauca, en la ciudad de Popayán; el Archivo Histórico Municipal de Cali, en la ciudad de Cali; el Archivo Histórico de Buga, en la ciudad de Buga y La Casa del Virrey, en la ciudad de Cartago. Cabe anotar que en algunos archivos no necesariamente acopiamos datos sobre el evento, pero se deja la evidencia para futuras investigaciones.

4.1.2. Fuentes bibliográficas e impresas

Corresponden a documentos logrados en diferentes sitios como la Biblioteca Luis Ángel Arango, Biblioteca del Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana, en la ciudad de Bogotá; Biblioteca del Banco de la República, en las ciudades de Cali, Popayán y Buenaventura; Biblioteca Departamental del Valle, Biblioteca Centenario, Biblioteca de la Universidad del Valle y Centro de Documentación del Departamento de Historia de la Universidad del Valle, en la ciudad de Cali. Esta documentación fue clasificada como:

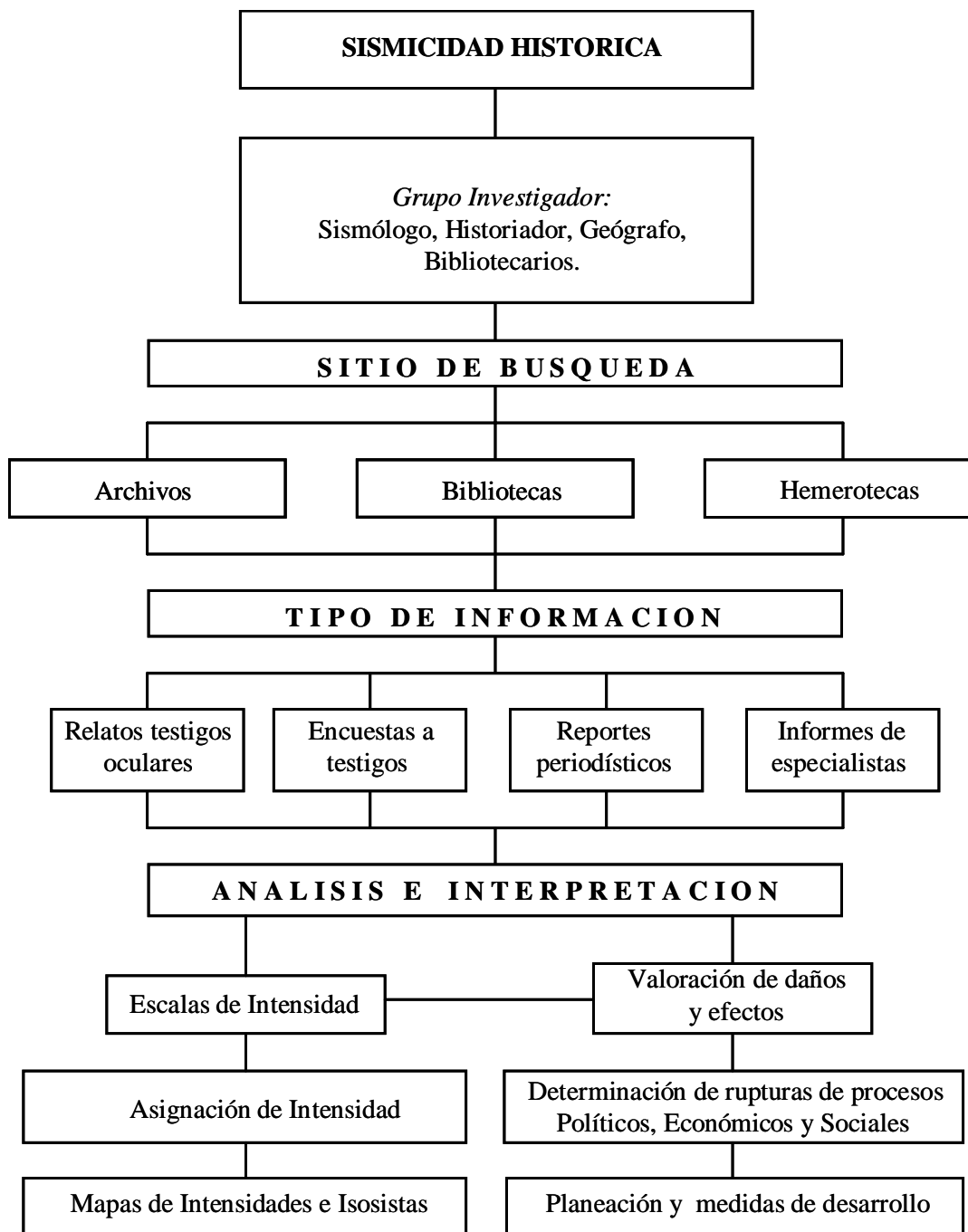


Figura 2. Esquema del proceso de búsqueda de información seguido para la interpretación de parámetros del terremoto del 7 de Junio de 1925 (Modificado de Salcedo, 2001).

- a. *Documentos oficiales:* Libros, Memorias, Diarios, Informes y Crónicas.
- b. *Periódicos y revistas:* Diarios, Semanarios y Publicaciones Seriadadas.

Periódicos y Revistas

Corresponden a publicaciones seriadas con información acerca del evento, que permite establecer los impactos de manera casi inmediata; algunos de ellos con fotografías. Se

revisaron periódicos de circulación nacional, regional y local existentes para la época de ocurrencia del terremoto. Estos periódicos, independientemente de su tendencia o corte político, religioso, económico, etc. fueron seleccionados bajo el criterio de cobertura geográfica sobre la región del suroccidente colombiano, considerada como la zona más afectada. De esta manera, se identificaron y revisaron numerosos periódicos locales y regionales editados en Cali o poblaciones circunvecinas.

El resultado de la búsqueda de las fuentes documentales se presenta en la Tabla 2, que describe las referencias completas de los documentos con información sobre el evento bajo estudio. En la Tabla se indica el nombre de la fuente, autor (persona quien escribió el documento original), año de escritura o publicación, tipo de fuente, número de páginas y la localización espacial o centro de documentación donde se ubica el documento.

4.2. Ficha bibliográfica para captura de la información

Para capturar y almacenar la información se utilizó una ficha bibliográfica donde se consignan los datos de cada noticia sísmica encontrada (Salcedo, 1999). En ella se transcribe fielmente la noticia, señalando la fuente bibliográfica, los parámetros del sismo, los daños y las poblaciones afectadas. El modelo de la ficha bibliográfica

se presenta en el apéndice 1. Para sintetizar los datos encontrados en cada fuente y facilitar el análisis e interpretación general se elaboró una segunda ficha denominada “Ficha Resumen de Efectos del Terremoto” (FRET), cuyo modelo aparece en el apéndice 2.

4.3. Criterios para identificación de efectos y asignación de intensidades

En la asignación del nivel de intensidad en cada población afectada se utilizó la Escala Macrosísmica Europea – EMS/98 – (Grunthal, 1998), que según (Salcedo y Franco (2001) su descripción se ajusta mejor a las particularidades estructurales, culturales y naturales del territorio colombiano; dando mejores ventajas que las que se obtienen al utilizar las escalas MSK-64 y Mercalli Modificada, tradicionalmente usadas en nuestro medio.

Para valorar la confiabilidad de la información y la certeza en la estimación de la intensidad a cada valor le fue asignado un criterio del Factor de Calidad Q , descrito de la siguiente forma (Salcedo, 1999; 2002):

- el sismo fue sentido y la información es suficiente y verás para dar un valor apropiado de intensidad;
- el sismo fue sentido, pero la información no es suficiente para dar un valor de intensidad confiable;

Tabla 2. Documentos bibliográficos con información sobre el terremoto del 7 de junio de 1925.

Nombre de la Fuente	Autor	Año	Tipología	Paginas	Localización*
El Relator	---	1925	Periódico	1-3	1
Correo del Cauca	---	1925	Periódico	1, 6, 8	1
El Tiempo	---	1925	Periódico	1, 3	5
El Gráfico	---	1925	Periódico	3	1
Cali ciudad conquistadora	Nicolás Ramos Hidalgo	S. A.	Libro	92-93	5
Popayán	Arcesio Aragón	1930	Libro	406	5
Territorio, Construcción y Espacio	Benjamín Barney Caldas	1999	Artículo – Revista	5	4
Historia de los terremotos en Popayán	Diego Castrillón	---	Libro	30	4, 5

* Localización

1. Biblioteca departamental de la ciudad de Cali
2. Centro de documentación del Banco de la República de la ciudad de Cali
3. Biblioteca Luís Ángel Arango de la ciudad de Bogotá
4. Biblioteca Mario Carvajal de la Universidad del Valle en la ciudad de Cali
5. Archivo Central del Cauca, localizado en la ciudad de Popayán

- c. la información es insuficiente y dudosa para una buena asignación de la intensidad

La figura 3, sintetiza el procedimiento metodológico seguido.

5. ANÁLISIS MACROSÍSMICO

5.1. Poblaciones afectadas y descripción de efectos

En la Tabla 3, elaborada a partir de la información de fuentes primarias y secundarias, se describen las poblaciones donde el sismo causó daños o al menos fue sentido. Se aprecia que los mayores daños tuvieron lugar en las zonas central y norte del departamento del Valle del Cauca; siendo más notorios en la ciudad de Cali, donde algunos edificios pertenecientes a instituciones públicas, varias iglesias y casas fueron afectados considerablemente.

La Tabla 4 resume los principales daños y efectos causados en personas, objetos y construcciones en esta ciudad; las Figuras 4 y 5 muestran fotos de los escombros de la iglesia Ermita y las ruinas de lo que fuera el Hotel Francia, respectivamente.

Los efectos ocurridos en otras poblaciones localizadas al norte de Cali se presentan en la (Tabla 5).

Otros efectos

Algunas fuentes como el periódico El Relator mencionan el hundimiento del terreno en el lugar donde quedaba ubicado el templo de La Ermita. Aunque este dato puede ser interpretado como la aparición de efectos en la naturaleza, especialmente licuación, cabe anotar que no se encontró mayor información al respecto; por lo tanto, para evitar la sobreestimación del valor de la intensidad éste no ha sido tenido en cuenta.

Otro tipo de información señala que el sismo causó apagón general; el reloj de la torre de una iglesia se detuvo a la hora exacta del terremoto, faltando 23 minutos para las siete; también se pararon otros relojes de péndulo. El ganado listo para el sacrificio huyó despavorido. El sistema telegráfico sufrió daños debido al rompimiento de varios cables y de las baterías.

5.2. Análisis de efectos y mapa de intensidades

Como ha sido descrito, los daños observados en templos e iglesias fueron principalmente agrietamientos de muros y desprendimientos de cornisas, capiteles y cúpulas.

Tabla 3. Poblaciones o regiones donde se sintió el sismo del 7 de junio de 1925.

Población	Característica Geográfica	Departamento o Región
Bogotá	Capital de la República	Cundinamarca
Buenaventura	Municipio	Valle del Cauca
Buga	Municipio al norte de Cali	Valle del Cauca
Calarcá	Municipio	Quindío
Cali	Capital departamento	Valle del Cauca
Cañavalejo	Sitio al suroeste de Cali	Valle del Cauca
Cerrito	Municipio al norte de Cali, cerca de Buga.	Valle del Cauca
El Líbano	Municipio	Tolima
Girardot	Municipio	Tolima
Ibagué	Capital departamento	Tolima
Juanchito	Sitio de Candelaria al nororiente de Cali, paso del río Cauca.	Valle del Cauca
La Cruz	Municipio	Nariño
La Cumbre	Municipio	Valle del Cauca
La Unión	Municipio al norte de Cali	Valle del Cauca
Manizales	Capital departamento	Caldas
Palmira	Municipio al norte de Cali.	Valle del Cauca
Pasto	Capital departamento	Nariño
Pereira	Capital departamento	Risaralda
Pichindé, San Antonio y otras	Corregimientos de Cali	Valle del Cauca
Popayán	Capital departamento	Cauca
Restrepo	Municipio	Valle del Cauca
Roldadillo	Municipio al norte de Cali.	Valle del Cauca
Salento	Municipio	Quindío
Subachoque	Municipio	Cundinamarca
Tuquerres	Municipio	Nariño
Yotoco	Municipio al norte de Cali, cerca de Buga.	Valle del Cauca

Tabla 4. Principales daños y efectos causados por el terremoto del 7 de junio de 1925 en Cali.

EFFECTOS EN PERSONAS	
Un muerto y varios heridos. Pánico general. Todas las personas corrieron a las calles y muchos sintieron mareos.	
EFFECTOS EN OBJETOS	
Todos los frascos de la botica en la Clínica se quebraron. En casi todas las cantinas se quebraron todas las botellas.	
EFFECTOS SOBRE ESTRUCTURAS Y EDIFICACIONES	
<i>Iglesia</i>	<i>Tipo de daños y efectos</i>
San Pedro	Sufrió daños gravísimos, varios arcos quedaron perfectamente vencidos, muchas cornisas y capiteles se desprendieron y en general el techo sufrió graves lesiones, lo mismo que las torres del reloj; muchas partes agrietadas; todos los arcos quedaron partidos.
San Francisco	Fue una de las que más sufrió; cayeron algunos ladrillos de la cornisa. La cúpula o media naranja se desplomó; daños graves, la bóveda destruida, grietas de suma gravedad en varias paredes y muros. Fue cerrada por reparaciones.
La Ermita	La Ermita de Nuestra Señora de la Soledad del Río, quedó totalmente destruida. Se menciona su hundimiento y destrucción.
San Nicolás	La torre fue totalmente desplomada.
Santa Rosa	Sufrió algunos agrietamientos de poca consideración; se desprendieron algunos objetos de adornos de la torre.
La Merced	Sufrió bastante; los muros sufrieron muy graves daños; algunos abovedados y uno de los portales se desplomaron.
Santa Librada	La capilla del colegio sufrió gravísimos daños. La cúpula de la torre se desprendió completamente.
<i>Otras edificaciones</i>	<i>Tipo de daños y efectos</i>
Casas y edificios	Todas las casas y edificios de la ciudad sufrieron averías; algunas fueron totalmente derruidas, otras sufrieron graves daños
Salón Moderno	Se desprendieron ladrillos y la cornisa
Hotel Francia	Totalmente destruido
Edificio del Relator	Sufrió daños de significación
La Clínica	Quedó casi en ruinas
El Matadero	Cayó una pared
El Cuartel	Una de las torrecillas se desplomó y la otra quedó averiada
Casa Municipal	El edificio donde funcionan las oficinas de la alcaldía sufrió daño considerable.
Las Casas del Sindicato Popular	Construidas en adobe, fueron destruidas totalmente

Tabla 5. Principales daños y efectos causados por el terremoto del 7 de junio de 1925 en algunas poblaciones ubicadas al norte de la ciudad de Cali.

Población	Tipo de daños y efectos
Restrepo	Sentido fuertemente. Varias casas derrumbadas
La Cumbre	Pánico general. Una señora muerta. Se desplomó parte de la bodega del ferrocarril
Palmira	Pequeño daño en la iglesia
La Unión	Daños en la iglesia. Cayeron las cantinas
Buga	En el templo se cayeron tres cúpulas. En muchas casas hubo desperfectos.
Pereira	Las paredes de algunos edificios se averiaron
Cerrito	<ul style="list-style-type: none"> • Se desprendió la cúpula de la iglesia, • Daños en el interior y afuera en la iglesia, • La Casa Municipal y la Escuela de varones sufrieron graves daños. • El convento de la Reverendas Hermanas tuvo graves daños, quedó con varias averías. • En muchas casas hubo daños leves.
Roldadillo	Las paredes de las casas crujían y amenazaban caerse. Causó daños en la iglesia y en muchos edificios.

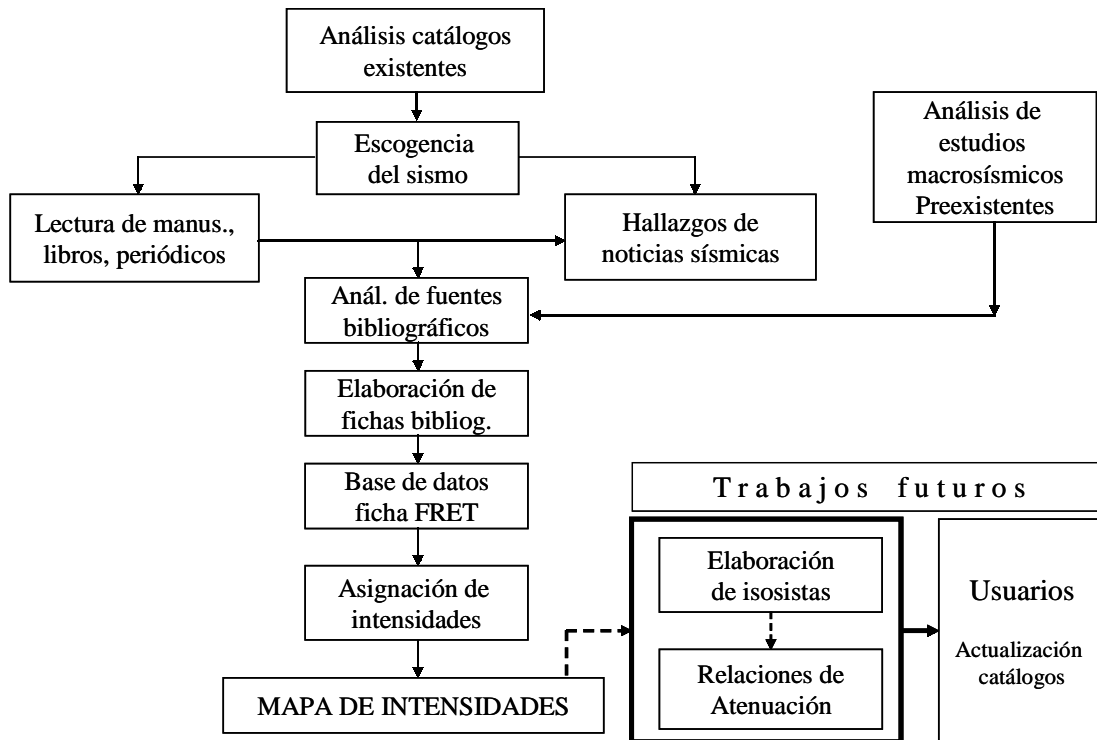


Figura 3. Flujograma metodológico de investigación seguido para el terremoto del 7 de Junio de 1925, señala que tipo de actividades pueden seguir para este evento.

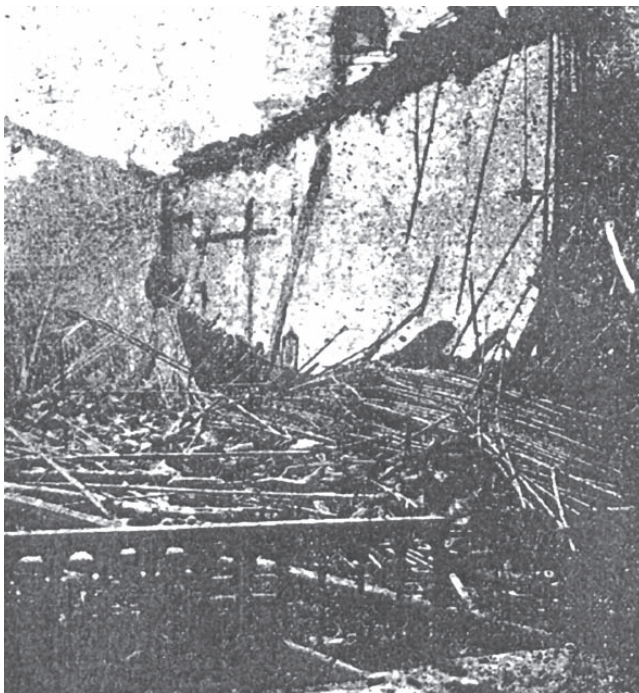


Figura 4. Escombros en que quedó convertida La Ermita después del terremoto; vista tomada desde el presbiterio (Foto El Relator, 9 de Junio de 1925).



Figura 5. Aspectos de las ruinas en que quedó el Hotel Francia después del terremoto del 07 de Junio de 1925. (Foto El Relator, 8 de Junio de 1925).

las, como ocurrió en las iglesias de San Pedro, San Francisco, La Ermita, San Nicolás, Santa Rosa, La Merced y la capilla de Santa Librada. Daños mayores se notaron en edificaciones como el Salón Moderno, el Edificio del diario El Relator, La Clínica, El Cuartel de la policía y la Casa Municipal. Otros edificios como el cuartel del Ejército, el edificio Emilio Otero, los edificios de la administración municipal y del Ferrocarril del Pacífico y el hotel Magestic presentaron daños de consideración. El hotel Francia fue destruido totalmente. Según reportes del diario El Relator, no quedó casa alguna sin averías. A pesar de la fuerza del sismo y los daños estructurales señalados, sólo se informa de un muerto producto de la caída de la cornisa del edificio del Salón Moderno.

La Figura 6 muestra la zona de daños sobre el mapa de expansión poblacional de Cali en la fecha del terremoto. Estos se han sobrepuesto al perímetro actual de la ciudad, indicándose algunas de las comunas que hoy existen.

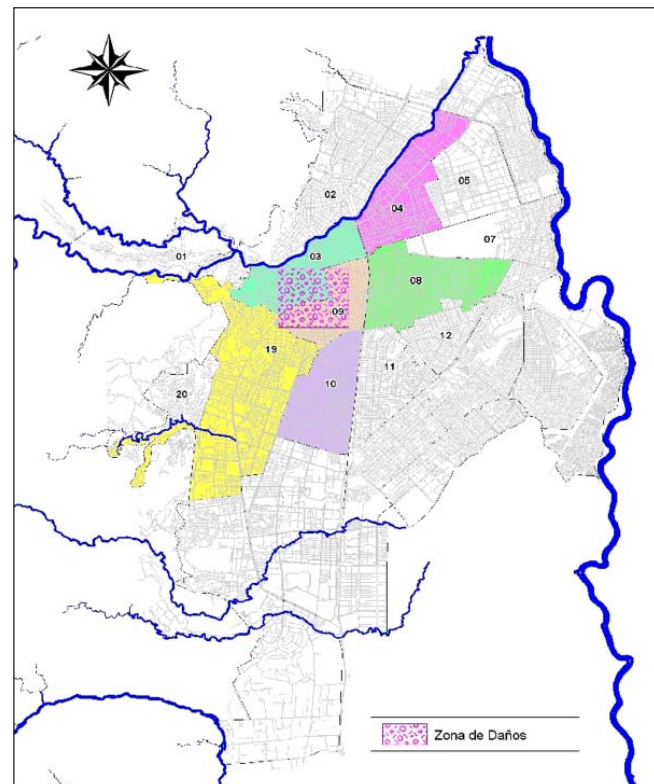
Estos efectos fueron analizados teniendo en cuenta la Escala Macrosísmica Europea de 1998, determinándose para cada centro poblado afectado un valor de intensidad como se muestra en la Tabla 6, donde se indica el nombre de la población, el valor de intensidad y el Factor de Calidad Q .

La asignación de intensidades en las poblaciones afectadas, casi todas ubicadas al norte de la ciudad de Cali, permite establecer una línea de tendencia de daños de carácter regional que, como se lo muestra el mapa regional de intensidades, se extiende en dirección SW – NE en el suroccidente del país (Figura 7). Esta línea de tendencia de daños coincide con el azimut de las principales fallas geológicas existentes en la región (París y Romero, 1993).

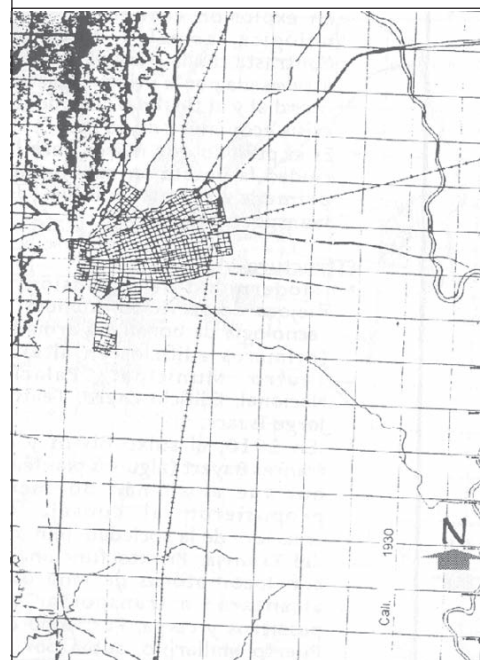
A pesar de la evaluación de los efectos y la asignación de intensidades en diferentes poblaciones, se considera que la información aun no es suficiente para trazar un mapa de isosistas confiable para establecer parámetros sismológicos de interés para la evaluación del peligro sísmico como el epicentro macrosísmico, intensidad epicentral (obsérvese que hasta ahora sólo se ha determinado como sitio de mayor intensidad la ciudad de Cali, lo que no significa que ésta representa la intensidad epicentral, puesto que tampoco ha sido evaluado el epicentro macrosísmico), profundidad hipocentral y ley de atenuación, entre otros.

6. Futuras investigaciones macrosísmicas

La fuente principal de datos para la investigación macrosísmica la representan los estudios de sismicidad



La región en colores corresponde al área de la ciudad



Extensión territorial de Santiago de Cali en el año 1925 (Adaptado de Jiménez y Bonilla, 2000)

Figura 6. Localización de la zona de daños en la ciudad de Santiago de Cali por el terremoto del 7 de Junio de 1925.

Tabla 6. Asignación de intensidades en las diferentes poblaciones afectadas por el terremoto del 7 de junio de 1925.

Población	Intensidad (EMS-98)	Calidad Q	Comentarios
Buenaventura	V	B	---
Buga	VII	A	---
Calarcá	V	B	---
Cali (Urbano)	VII-VIII	A	Se menciona el hundimiento de la ermita, que además se destruyó. Aunque este dato podría interpretarse como un efecto de licuación debido a que por ese lugar atravesaba el río Cali antes de ser desviado, pudiendo quedar terrenos muy saturados. Sin embargo, el dato no es muy preciso, razón por la cual no se ha tenido en cuenta la asignación del valor de intensidad.
Cañavalejo*	VII	B	---
Cerrito	VII	B	---
Girardot	V	B	---
Ibagué	VI	B	---
Juanchito*	VII	B	---
La Cumbre	VII	B	---
La Unión	VII	B	---
Palmira	VI	B	---
Pereira	V	B	---
Pichindé, San Antonio*	V	B	---
Popayán	VI	A	---
Restrepo	VII	B	---
Roldadillo	VI	B	---
Yotoco	V	B	---

* - corregimiento perteneciente a Cali.

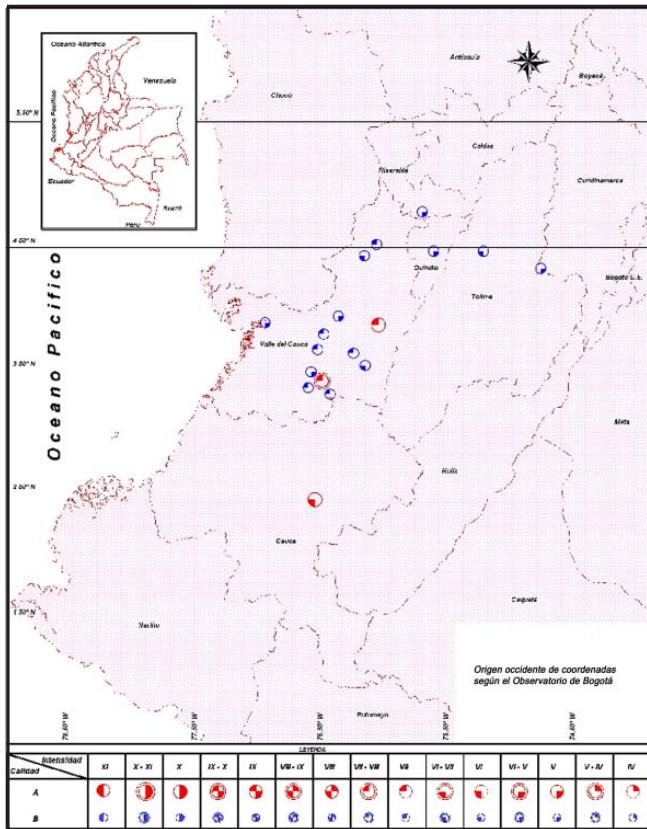


Figura 7. Mapa regional de intensidades del terremoto del 7 de Junio de 1925.

histórica (Salcedo y Tabares, 2001). La macrosísmica conduce al conocimiento de las particularidades fenomenológicas de los terremotos, en especial los parámetros de localización hipocentral, zonas de daños, extensión horizontal y vertical de la ruptura, mecanismo focal, momento sísmico y la atenuación de la intensidad (Salcedo, 2002). De esta forma, estos estudios generan datos e información que tienen carácter de complementariedad frente a los datos instrumentales; de manera que con ellos también se alimentan los catálogos sísmicos de una región sismoactiva (Postpischl et al., 1991).

En su mayoría, los sismos ocurridos en periodos preinstrumentales resultan ser de mayor intensidad que los recientes, por lo cual en muchas regiones del mundo no se conocen los sismos grandes que las han afectado, quedando un vacío substancial en el conocimiento sísmico de las grandes intensidades y su periodo de retorno, lo que dificulta la evaluación confiable del peligro sísmico (Guidoboni and Stucchi, 1993).

Entonces, de los estudios macrosísmicos sobre un terremoto particular se espera el aporte en la determinación de parámetros sismológicos que llenen el vacío que tiene los catálogos por la carencia de redes sísmicas o por el corto periodo de registro instrumental. Con este propósito se llevó a cabo este estudio que presenta datos sismológicos relevantes para la interpretación del área de

percepción del terremoto del 7 de junio de 1925, evaluando el valor de intensidad en cada población afectada.

En el futuro se debe continuar con la investigación macrosísmica para encontrar mayor información que amplíe el área de percepción y se logre trazar el respectivo mapa de isosistas. Con ello, se espera determinar el epicentro macrosísmico, la profundidad focal, las extensiones verticales y horizontales del foco y establecer, en lo posible, un patrón o relación empírica de atenuación (ver Figura 3). No cabe duda que toda esta información permitirá mejorar el conocimiento, no sólo de este terremoto sino de las características sismológicas de la región del suroccidente colombiano, aportando datos e información de utilidad para ajustar los estudios de peligro y riesgo sísmico.

7. Conclusiones

El terremoto del 7 de junio de 1925, ocurrido en el territorio colombiano generó una zona de daños que marca una línea de tendencia en dirección SW – NE. Esta línea de tendencia de daños, que se deduce del mapa de intensidad regional, coincide con el azimut de las principales fallas geológicas existentes en el suroccidente del país. Por tal razón, se considera que este es un evento de referencia para la evaluación del peligro sísmico de la región.

El análisis de los efectos hasta ahora evaluados revela que los daños más graves fueron en la ciudad de Cali, donde se estima una intensidad de VII-VIII en la escala EMS-98. Además de los daños en la mayoría de las casas de la ciudad, también fueron afectadas gravemente las iglesias, hoteles y otras edificaciones donde funcionaban importantes entidades públicas.

Varios autores presumen que el sismo pudo haber sido causado por una fuente regional ubicada en el suroccidente del país; sin embargo, los estudios macrosísmicos realizados no revelan información suficiente que permita asignar con precisión parámetros sismológicos que determinen la fuente sismogénica causante y sus características físicas. Por lo tanto, se espera que en el futuro se realicen estudios complementarios que conduzcan a la elaboración del mapa de isosistas y a la determinación del epicentro macrosísmico. De igual manera se deberá evaluar la intensidad epicentral, los parámetros hipocentrales, las extensiones horizontal y vertical del foco y el patrón de atenuación de la intensidad.

Agradecimientos

Este trabajo se inició con la investigación sobre sismicidad histórica dentro del proyecto de Microzo-

nificación sísmica de la ciudad de Cali, ejecutado por INGEOMINAS, con la participación de la Universidad del Valle. Los recursos del proyecto fueron aportados por la Alcaldía Municipal de Santiago de Cali y el Departamento Administrativo de la Gestión del Medio Ambiente (DAGMA). La interventoría estuvo a cargo de la Asociación de Ingenieros del Valle (AIV). Agradecemos a los directivos de la Universidad del Valle, que facilitaron y permitieron la participación institucional en la investigación.

El éxito en la búsqueda de información no hubiese sido posible sin el apoyo de los directivos y funcionarios de la Biblioteca Luis Ángel Arango, El Archivo Histórico Nacional, en la ciudad de Bogotá; El Archivo Histórico Central del Cauca, en Popayán; El Archivo Histórico de Cali, La Biblioteca Departamental de Cali, El Centro documental Banco de la República, La Biblioteca Mario Carvajal de la Universidad del Valle, en la ciudad de Cali, quienes nos brindaron una invaluable colaboración.

De manera especial, expresamos nuestros agradecimientos a los evaluadores anónimos cuyos comentarios y correcciones fueron determinantes para la versión final del presente artículo.

Bibliografía

- Aragón A.**, (1930). Popayán. Bogotá. Imprenta Nacional. 500 pp.
- Barney-Caldas B.** (1999). De Santiago de Cali a Cali. Revista CITCE: Territorio, Construcción y Espacio. No. 2. Universidad del Valle, Cali. p. 3-15.
- Castrillon-Arboleda D.** Historia de los Terremotos en Popayán. s.p.i.
- Escallón J., Pinzón J. E., Gómez I. C.**, (1993). Proyecto Sismotectónica de Colombia. Actualización de la información sísmica. INGEOMINAS, Informe interno. 93p.
- Espinosa A., Gómez-Capera A. and Salcedo-Hurtado E.**, (2004). State-of-the-art of the Historical Seismology in Colombia. *Annals of Geophysics: Investigating the records of past earthquakes*. Vol. 47, No. 2/3, April/June. p. 437-449.
- GERSCO**, (1987). Informe de sismicidad histórica. Inédito.
- Goberna R.**, (1983). Seismological investigations in Colombia. *Earthquake Information Bull.*, V. 15, No. 1, p.7-10.
- Grünthal G.** (Edit.), (1998). *European Macroseismic Scale 1998, EMS-98*. Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15. Luxembourg. 99p.
- Guidoboni E. and Stucchi M.**, (1993). The contribution of historical records of earthquakes to the evaluation of seismic hazard. In: *Anali di Geofisica/Global Seismic Hazard Assessment Program for the UN/IDNDR*. Editors: D. Giardini and P. Basham. Vol. XXXVI, No. 3 - 4, p. 201-215.
- Gutenberg B. and Richter C. F.**, (1954). *Seismicity of the earth and associated phenomena*. Princeton University. 310p.

- Jiménez Y. & Bonilla B.**, (2000). Acueducto y alcantarillado 1900 – 1970. Cuadernos CITCE. Serie de Investigaciones No. 5. p.15.
- Mendoza D., Rosales C., Velásquez A. y Meyer HJ.**, (2004). Revisión macrosísmica de los parámetros hipocentrales del terremoto del 7 de Junio de 1925 ($M_s = 6,8$) en Colombia. I Congreso Latinoamericano de Sismología, II Congreso Colombiano de Sismología. Agosto 16 al 21, Armenia – Quindío. Memorias.
- Ocampo J. A.**, (1986). Historia del desarrollo industrial en Cali. Cali, 450 años. Alcaldía Municipal de Cali.
- París G. y Romero J.** (1993). Mapa de Fallas Activas de Colombia. Bol. Geol., Vol. 34 (2 - 3), INGEOMINAS. p. 5-25.
- Postpischl D., Stucchi M. and Bellani A.**, (1991). Some ideas for data of macroseismic data. Tectonophysics. No. 193: 215-223.
- Proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Cali**, (2004). Informe del estudio de sismicidad histórica. Grupo Universidad del Valle.
- Ramírez J. E.** (1948). The Rev. Simon Sarasola, S.J. 1871-1947. Bull Seism. Soc. Am., V. 38, No. 3. p. 229-231.
- Ramírez J. E.** (1975, 1969). Historia de los Terremotos en Colombia. 2da. ed. Bogotá. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 250 pp.
- Ramos-Hidalgo N.** (1946). Cali, Ciudad Conquistadora. Universidad del Valle. 199 p.
- Salcedo E.** (1999). Estudio de Sismicidad Histórica en la Región de Bucaramanga (Colombia). Rev. Acad. Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. XXIII, No. 87. p. 233-248.
- Salcedo E.** (2002). Sismicidad histórica y análisis macrosísmico de Bucaramanga. Boletín Geológico INGEOMINAS, No. 40. Santafé de Bogotá. 180p. ISSN – 0120-1425.
- Salcedo E. y Franco, L. E.** (2001). Una Escala de Intensidad para Colombia. Rev. Horizontes Naturales de la facultad de Ciencias Exactas y Naturales- Universidad de Caldas. No. 3. p. 67-77.
- Salcedo E. y Tabares L. M.** (2001). Sismicidad histórica una herramienta de trabajo en macrosísmica. Memoria del VIII Congreso Colombiano de Geología. Manizales.
- Salcedo E., Romero M. D., Vallejo-Chocué M. A. y Cortés M. A.** (2004). Estudio de sismicidad histórica. Proyecto de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Cali. INGEOMINAS-UNIVALLE. Inédito.
- Vásquez E.**, (2001). Historia de Cali en el siglo 20. Universidad del Valle, Cali. p. 72.

Fuentes Hemerográficas

- Periódico El Relator.** Cali. Del 8 al 14 de Junio de 1925.
- Periódico Correo del Cauca.** Año XXIII. No. 4811. Cali. 8 de Junio de 1925.
- Periódico El Tiempo.** Bogotá. 8 de Junio de 1925.
- Periódico El Gráfico.** Bogotá. 13 de Junio de 1925.

Recibido: 18 de octubre de 2006

Aceptado para su publicación: agosto 3 de 2007

APÉNDICE 1

Modelo de ficha bibliográfico para la captura de información sobre terremotos históricos.

Ficha No. _____

TERREMOTO DEL 07 DE JUNIO DE 1925 – COLOMBIA –

DATOS DE LA FUENTE:

1. *Título de la publicación o del documento de archivo:* EL RELATOR
2. *Ciudad donde se imprime o donde se encuentra el archivo:* CALI- COLOMBIA
3. *Tipo de publicación o del documento:*
 - a. *REVISTA:* ____: *Periodicidad* _____, *Vol.* _____, *No.* _____, *Año* _____
 - b. *PERIODICO:* X: *Periodicidad:* **Diario** ____, *Día:* **Lunes 8** __, *Mes:* **Junio** , *Año:* **1925** __
 - c. *LIBRO:* ____: *Autor:* _____, *Año:* _____,
Editorial: _____, *Páginas:* _____
 - d. *ARCHIVO:* ____: *Sección:* _____, *Fondo:* _____,
Tomo ____, *Signatura* _____, *Folios* _____, *Fecha* _____
 - e. *OTRO:* ____: *Especifique:* _____
4. *Autor, Título del artículo y número de página(s):* El pavoroso terremoto de anoche. p. 1.
5. *Lugar: Biblioteca, Hemeroteca o Archivo donde se encuentra:* Biblioteca Departamental, Cali.

INFORME SOBRE LA NOTICIA SISMOLÓGICA:

Fecha del evento: Día: **Domingo 07**_, Mes: **Junio**_, Año: **1925**_, Hora: **18:45**_

Transcripción: texto completo en su forma original. Las palabras ilegibles en documentos antiguos, son substituidas por líneas punteadas entre paréntesis. Si es necesario usan hojas anexas.

El temblor fue general en todo el país. Dos muertos en Calarcá Inmenso pánico en varias ciudades.

Bogotá, 8.

Han sido muy lamentadas las desgracias ocurridas en esta ciudad con motivo del terremoto, y se confía en que no sean mayores.

En esta capital se sintió el temblor a las 6 y 40. Fue de gran intensidad, pero no causó daños materiales, ni desgracias personales. La aguja del Observatorio de San Bartolomé se salió del cuadrante.

...

APÉNDICE 2

Modelo de ficha resumen de efectos para la captura de información y evaluación de intensidades de terremotos históricos.

FICHA RESUMEN DE EFECTOS DE TERREMOTOS (F.R.E.T.)
TERREMOTO DEL 07 DE JUNIO DE 1925 –COLOMBIA–

1. **FECHA Y HORA DEL EVENTO:** día, mes, año y la hora aproximada de ocurrencia del terremoto. Para la hora usar una sola notación, de 12 ó de 24 horas.

Día:	07	Mes:	Junio	Año:	1925	Hora:	18:37
------	----	------	-------	------	------	-------	-------

2. **FUENTES:** referencias completas de los documentos consultados que hacen mención del evento, indicando el nombre con el cual la fuente es conocida, el autor (persona quien escribió el documento original), el año cuando el documento fue escrito, el tipo de fuente, número de páginas, localización del documento.

No. Ficha	Nombre de la Fuente	Autor	Año	Tipología	Páginas	Localización
-----	El Relator	---	1925	Periódico	1-3	Bib. Deptal - Cali

3. **POBLACIONES MENCIONADAS:** nombre de las poblaciones o regiones donde el sismo, de acuerdo con los documentos, causó daño o fue sentido, característica geográfica (municipio, corregimiento, vereda, etc.), el departamento o región al cual pertenece, número de habitantes aproximados que tenía la población afectada en la fecha de ocurrencia del evento, y el tipo característico de las construcciones para ese tiempo.

Nombre de la Población	Característica Geográfica	Departamento o Región	Número Habitantes	Tipo de Construcción
Cali	Capital Departamento	Valle del Cauca	60.350 ¹	¿?

4. **EFECTOS:** tipos de efectos observados en cada población o región mencionada donde el sismo causó daños o fue sentido; se deben describir separados por cada población, clasificados entre primarios, secundarios y transitorios (ver escala EMS).

Nombre de la Población	Efectos y daños en:				
	Personas	Objetos	Construcciones	Naturaleza	Otros
Cali					

5. **EVALUACIÓN:** evaluación subjetiva del tipo y contenido del documento. En muchos casos son explicaciones adicionales (situación geográfica, estado de conservación de las construcciones afectadas, contexto socio-económico y político, etc.), los cuales pueden enriquecer y dar mayor profundidad a la lectura del documento desde el punto de vista sismológico.

6. **HIPÓTESIS DE INTENSIDAD:** de acuerdo con el análisis de los efectos y daños se asigna para cada población un valor de intensidad, indicando la escala macrosísmica utilizada, un factor de calidad (Factor Q), que pondera el grado de confiabilidad de la información usada para la asignación.

Nombre de la Población	Valor de Intensidad	Escala Macrosísmica	Factor Q	Comentarios
Cali	VII-VIII	EMS-92	A	

7. **COMENTARIOS ADICIONALES:** comentario de aclaración o explicación de alguna situación referente al estudio de este evento, que pueda ayudar a otra y mejor reinterpretación.

PSICOLOGÍA EN EL CONTEXTO DE LAS CIENCIAS NATURALES, COMPORTAMIENTO Y EVOLUCIÓN

Por

Rubén Ardila¹, Ph.D.

Resumen

Ardila, R.: Psicología en el contexto de las ciencias naturales, comportamiento y evolución. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 395-403, 2007. ISSN 0370-3908.

La psicología ha sido considerada a lo largo del desarrollo de la cultura occidental como el estudio de la psique, como el estudio de la mente y en el siglo XX y en el XXI como el estudio científico del comportamiento de los organismos. Se presentan los desarrollos de la psicología como área de conocimiento científico, a partir de 1879 con la fundación del primer laboratorio de psicología experimental en la Universidad de Leipzig (Alemania). Se señalan los dilemas que ha tenido que enfrentar la psicología, en lo que respecta a su objeto de estudio, su metodología, su inserción como ciencia natural y/o ciencia social, y la relación entre ciencia y profesión. Se enfatiza la importancia de utilizar un contexto evolutivo y el enfoque de ciencia natural. La investigación sobre “mente” y cognición animal y en general sobre el desarrollo filogenético de los procesos psicológicos, se presenta desde la perspectiva de la ciencia contemporánea.

Palabras clave: Psicología, evolución filogenética, comportamiento animal, ciencia natural.

Abstract

Psychology in the context of natural sciences. Behavior and evolution. Psychology has been considered during the development of Western science as the study of the psyche, as the study of the mind, and in the XXth and XXIth Centuries as the scientific study of the behavior of organisms. The development of psychology as a field of science is presented, beginning with the founding of the first laboratory of experimental psychology at the University of Leipzig (Germany) in 1879. The dilemmas that have faced psychology are pointed out: its subject matter, the methodology, natural science and or social science, scientific discipline and or applied profession. The relevance of using an evolutionary context, and the natural science approach, are indicated. Research on animal “mind” and cognition, and in general the phylogenetic foundation of psychological processes, is presented from the perspective of contemporary science.

Key words: Psychology, phylogenetic evolution, animal behavior, natural science.

¹ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: ruben.ardila@etb.net.co.

Los Fundamentos de la Psicología

La psicología ha sido un campo de interés para los pensadores de todos los tiempos y de todas las culturas. Encontramos conceptos psicológicos en los principales filósofos y científicos de todas las épocas. Este interés no es exclusivo de la cultura occidental, que tiene sus fundamentos en Grecia, sino que se encuentra también en otras culturas, en el Budismo, en el Confucionismo, en el Taoísmo e incluso en las culturas “primitivas” antes de la influencia de la cultura occidental. Los problemas de la mente, del comportamiento, de la manera como conocemos el mundo, como pensamos y razonamos, como actuamos, las diferencias entre las personas, el desarrollo humano desde la concepción hasta la muerte, las relaciones entre los individuos, el lenguaje, las pautas sociales, la familia, la sexualidad, el sentido de la vida y de la muerte, lo normal (deseable socialmente) y lo anormal (no deseable socialmente), han sido asuntos de gran interés en todas las culturas conocidas. Sumeria, Egipto, China, India, los primigenios habitantes de América, África, el Pacífico, poseían conceptos bastante elaborados de lo que nosotros llamamos “psicológico”.

En los filósofos pre-socráticos y en la Era de **Pericles** en Grecia, abundaron las disquisiciones sobre temas psicológicos. **Sócrates**, **Platón**, **Aristóteles**, sus sucesores, los autores de dramas épicos y trágicos, en fin toda la cultura griega de la época dorada, está impregnada de concepciones psicológicas. Es posible afirmar que la reflexión razonada y sistemática sobre la psicología comienza con **Aristóteles** y el *Tratado del Alma*, aunque obviamente con numerosos antecesores y con muchas reflexiones por parte de otros pensadores (pre-socráticos, estoicos, hedonistas, post-aristotélicos, etc.).

Esas reflexiones sobre la mente y el comportamiento continuaron durante la Edad Media, pero miradas desde la perspectiva de **San Agustín** y **Santo Tomás**, y en general de la filosofía cristiana. Con la llegada del Renacimiento, con **Roger Bacon**, **Francis Bacon**, **Leonardo Da Vinci**, **René Descartes** y el surgimiento de la ciencia moderna, todas estas concepciones evolucionaron y se tornaron más elaboradas. La psicología de los filósofos modernos fue una psicología “racional” o racionalista, no una psicología empírica. Consistió en una serie de “especulaciones de sillón”, muchas de ellas de sentido común, acerca del ser humano, la forma como percibimos, como aprendemos, como pensamos, como nos relacionamos con el mundo a nuestro alrededor y con nosotros mismos.

En muchos de estos filósofos se encuentran afirmaciones acerca de la posibilidad y necesidad de estudiar cien-

tíficamente la mente humana. Los asociacionistas y empiristas británicos, **Hobbes**, **Berkeley**, **Hume**, **John Stuart Mill** y muchas otras figuras de la filosofía moderna, afirmaron que se podían aplicar los métodos de la ciencia al estudio de la mente y de la conducta. Era una de las grandes fronteras del conocimiento humano, no solo conocer el universo, la materia y la vida desde la perspectiva científica sino también estudiarnos a nosotros mismos desde esa perspectiva (ver **Russell**, 1921)..

Wilhelm Wundt (1832-1920) fue el primero en aplicar de manera sistemática los métodos de la ciencia de la época, al estudio de la mente. En 1879 fundó en la Universidad de Leipzig el primer laboratorio de psicología experimental. **Wundt** es la culminación de un proceso, que tiene como antecesores a otros científicos destacados, ante todo de la cultura alemana como **Helmholtz**, **Weber**, **Fechner**, **Müller**, todos los cuales realizaron investigaciones experimentales sobre procesos psicológicos. La obra de **Wundt** constituye la culminación de esos trabajos. Marca un hito en la investigación al estudiar la mente y el comportamiento desde la perspectiva de las ciencias, ante todo de la fisiología. Los problemas a investigar los presentó la filosofía de la época, los métodos los colocó la fisiología. De este interjuego de filosofía y fisiología nace la psicología como área de conocimiento autónomo.

Entre 1879 y nuestros días han ocurrido muchos eventos importantes en la psicología. Se propusieron diferentes puntos de vista, “escuelas”, sistemas, paradigmas. La psicología se convirtió en un área de conocimiento aplicada y no solo en una ciencia de laboratorio. Tuvo que enfrentar una serie de “dilemas”, de encrucijadas, de decisiones, que hemos señalado (ver **Ardila**, 2007).

Los Dilemas de la Psicología

Podemos afirmar que la psicología ha tenido que tomar una serie de decisiones, enfrentar unas encrucijadas o dilemas, que se encuentran en la columna vertebral de la disciplina: son las siguientes:

1. El objeto de estudio de la psicología: ¿la psique?, ¿la mente?, ¿el comportamiento?
2. El papel de la metodología científica: ¿es la psicología una ciencia natural, una ciencia social/humana/ del comportamiento, o es parte de las humanidades?
3. La universalidad o particularidad de las leyes científicas en psicología: ¿son universales las leyes psicológicas o son contextuales y limitadas por la cultura?

4. El balance entre ciencia y profesión: ¿es la psicología una ciencia básica como la física o la biología, o es una profesión socialmente relevante como la ingeniería o la medicina, o es ambas cosas?

Existen muchas respuestas a las anteriores preguntas. Pero es posible que tengamos consenso en la comunidad científica en que la psicología es el estudio del comportamiento de los organismos. En que se trata de una ciencia natural y al mismo tiempo de una ciencia social. Que las leyes psicológicas son universales pero se especifican en un contexto determinado, culturalmente. Y que la psicología es tanto una ciencia como una profesión, aunque en las últimas décadas ha enfatizado mucho más su papel como profesión socialmente relevante, que como ciencia.

La psicología es el estudio del comportamiento de los organismos, entendiendo por comportamiento lo que un organismo hace o dice. Utiliza los métodos de las ciencias naturales y es una disciplina biológica (solo existen procesos psicológicos en los organismos vivos). Es también una ciencia social porque su campo de trabajo incluye (además de los animales no humanos), a la persona y su contexto social e histórico. El objetivo de la psicología es encontrar leyes universales, más allá de las limitaciones del tiempo y de la cultura, como es también el objetivo de las otras disciplinas científicas. La psicología ha centrado en los últimos decenios sus prioridades en volverse una profesión, un campo aplicado, que sea útil para mejorar la vida de los seres humanos. Estas aplicaciones son muy amplias e incluyen la salud mental y física, la educación, el trabajo, la sociedad, la cultura, la comunidad, el deporte, el sistema jurídico, la ecología y el medio ambiente, el desarrollo humano desde la concepción hasta la muerte.

Como ciencia que es, la psicología se diferencia de otras maneras de estudiar los problemas humanos que se fundamentan en diferentes cosmovisiones: ideológicas, políticas, religiosas, literarias y de otra índole.

Para que la psicología adquiriera su estatus de ciencia (natural), tuvo especial relevancia el estudio de los procesos psicológicos en su perspectiva filogenética. La aplicación de los principios evolutivos a la mente y sus orígenes. Esto llevó a investigar la psicología de los animales, la mente y la conducta de las otras especies que comparten nuestro contexto biológico.

La Mente de los Animales

El estudio de los fenómenos psicológicos, que fue uno de los tópicos de mayor interés para los pensadores

de todos los tiempos, tanto en la cultura occidental de origen griego como en otras culturas, consideró tácitamente que la mente era exclusiva de la especie humana. Sin embargo en pensadores como **Aristóteles** (384-322 A.E.C) y en **Plinio** (23-79 E.C.) abundan las ideas y especulaciones acerca de la mente de los animales. Son conceptos muy antropomórficos, que consideran que los animales poseen una vida mental muy parecida a la de los seres humanos.

Para **René Descartes** (1596-1650), por el contrario, existiría una diferencia fundamental entre animales y seres humanos, y es que los animales son “autómatas”, son “máquinas” y el ser humano posee un alma inmortal. El ser humano, está formado por un cuerpo como el de los animales que funciona como una máquina, pero, el cuerpo y la mente interactúan. Mientras que los animales son autómatas los seres humanos poseen mentes.

El estudio de la evolución fue una de las revoluciones científicas más importantes de todos los tiempos. Aunque las ideas generales acerca de los cambios que se llevaban a cabo en el universo, en los organismos e incluso en las sociedades habían sido parte de la cultura durante muchos siglos, fue **Charles R. Darwin** (1809-1882), quien compiló datos básicos y convincentes sobre los cambios evolutivos de las especies, y los integró en una teoría suficientemente plausible. La teoría afirma que todas las poblaciones que ocurren en forma natural están constante y gradualmente cambiando como resultado de una selección natural que opera sobre los organismos de acuerdo con su “encaje” (fitness) evolutivo (**Darwin**, 1859). Esto produjo una enorme diversidad de especies de plantas y de animales.

Darwin extendió su teoría para incluir a los seres humanos. En su libro *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex* (1871) quedó claro que los orígenes de la mentalidad humana podían encontrarse en los animales, y que en los seres humanos a su vez podrían encontrarse vestigios de la conducta de los animales. La continuidad filogenética incluía al hombre, y no se limitaba únicamente a sus estructuras orgánicas sino también a su mente y su conducta.

Su obra más psicológica se denomina *The Expression of the Emotions in Man and in Animals* (1872). Ha tenido gran influencia en los orígenes de la psicología animal (o psicología comparada), en la etología, y más recientemente en la psicología evolucionista. Podemos puntualizar que las principales contribuciones de **Darwin** a la psicología (ver **Ardila**, 1977) son las siguientes:

1. El concepto de evolución y su aplicación a los procesos psicológicos.

2. La psicología comparada o psicología animal.
3. El estudio de las emociones y su expresión en niños, animales, enfermos mentales y en diversas culturas.
4. La investigación etológica del comportamiento humano y especial el comportamiento infantil.

Los trabajos de **Darwin** y las importantes implicaciones que tuvieron en la ciencia moderna, llevaron a una conceptualización de la psicología muy centrada en la biología y en la evolución. Muchos psicólogos escribieron sobre **Darwin** y el origen de las especies por medio de la selección natural. Se insistió en que el ser humano no es esencialmente diferente de otros animales; cualquier diferencia es solo cuestión de grado. La psicología es el estudio biológico de la mente y la conducta y por lo tanto debe ser parte de las ciencias biológicas y no de la filosofía.

La evolución contradice el dualismo cartesiano. Al ser la mente parte de la naturaleza, existe en todos los organismos en mayor o menor grado. La inteligencia es la adaptación de la mente al medio circundante. Los procesos psicológicos deben estudiarse en relación con la función que cumplen dentro de la adaptación de los organismos al ambiente físico y social. **Thorndike** afirmó hace un siglo (1909) lo siguiente: “**Darwin** les mostró a los psicólogos que la mente no solo es, sino que se ha desarrollado, que posee una historia lo mismo que un carácter y que esta historia abarca cientos de miles de años, y que el presente de la mente solo puede entenderse completamente a la luz de su pasado total“ (p. 70).

El estudio de los procesos psicológicos de los animales no humanos ha sido una columna vertebral de la psicología como ciencia natural. No nos estamos refiriendo ya más al alma como en épocas pretéritas, ni a especulaciones carentes de base, ni a ideologías, ni a razonamientos “de sillón”. Nos estamos refiriendo a la continuidad de los procesos superiores en las especies vivientes. Algo que **Darwin** (1859) valoró mucho al afirmar que: “La psicología se va a basar de manera segura en nuevos fundamentos... la necesaria adquisición de cada capacidad mental de manera gradual. Esto arrojará mucha luz sobre el origen del hombre y de su historia” (p.373).

En relación con la psicología evolucionista, que constituye la aplicación de las ideas de **Darwin** a la conducta humana en su perspectiva contemporánea, ver a **Buss** (1999).

La Psicología Comparada

La investigación de la psicología de los animales no humanos presupone un marco de referencia evolutivo, una

continuidad de los procesos psicológicos a lo largo del desarrollo de las especies. Aquello que supuestamente caracterizaba a la especie humana – el lenguaje, el pensamiento, la capacidad de conocer el mundo, el razonamiento, la solución de problemas, la vida social, la afectividad, el concepto de tiempo, el concepto de número, la moral, el altruismo, la planeación del futuro, la comprensión de símbolos – comenzó a ser estudiada en animales no humanos. Sobre psicología comparada ver a **Greenberg** y **Haraway** (1998), y a **Papini** (2002), entre otros autores.

Esto constituyó una revolución en psicología y en general una revolución en ciencia. Sin embargo la parte negativa del proceso fue que inicialmente se basó en estudios anecdóticos, no controlados, antropomórficos. El Clever Hans, los animales que podían entender nuestro lenguaje, etc., fueron una vertiente antropomórfica que no condujo a investigaciones científicas sólidas. La parte que se fundamentó en el laboratorio, en investigaciones contrastables y replicables está asociada en sus comienzos con **C. Lloyd Morgan** (1852-1936), un psicólogo británico que se considera uno de los “padres” de la psicología comparada o psicología animal. **Morgan** insistió en basarnos en hechos de laboratorio, comparables y repetibles y en no atribuir funciones superiores a los animales si la conducta podía explicarse con base en funciones de menor jerarquía. El llamado “Cánon de **Lloyd Morgan**” afirma lo siguiente:

“En ningún caso podemos interpretar la acción como el resultado del ejercicio de una facultad psíquica superior, si puede ser interpretada como el resultado del ejercicio de otra que se encuentre a nivel inferior en la escala psicológica” (**Morgan**, 1894, p. 53).

Por lo tanto, es preferible no hacer inferencias sobre procesos psicológicos superiores en los animales si podemos entenderlos de manera más simple. El principio de parsimonia, de simplicidad, es fundamental en ciencia. Y esto se aplica en forma muy clara al estudio de la psicología animal.

Psicología comparada se define como el estudio de los procesos psicológicos en animales no humanos, como la evolución y el desarrollo del comportamiento. El término se utiliza porque en sus comienzos se buscaba comparar los procesos psicológicos de los animales no humanos y aquellos que encontramos en nuestra especie. Es una rama de la psicología que debe mucho a **C. R. Darwin** (1809-1882), y ha tenido como pioneros a **G. J. Romanes** (1848-1894), **C. L. Morgan** (1852-1936), **T. E. Mills** (1847-1915), **M. F. Washburn** (1871-1939), **E. L. Thorndike** (1874-1949), **J. B. Watson** (1878-1958), **E.**

C. Tolman (1886-1959), **M. E. Bitterman** (1921-), **N. J. MacKintosh** (1935-), **E. Tobach** (1921-) y otros.

Los animales no humanos se pueden estudiar por varias razones: (1) por el animal en sí mismo, su evolución, su comportamiento, su nicho ecológico, (2) como modelo para los procesos psicológicos de los seres humanos, (3) por su utilidad práctica, en el control de especies dañinas para el ser humano, en las cadenas alimentarias, en la preservación del medio ambiente.

Como modelo de los procesos psicológicos humanos (lenguaje, razonamiento, numerosidad, comportamiento moral, altruismo) el estudio de los procesos psicológicos en animales no humanos ha arrojado muchas luces sobre los orígenes de la conducta humana (ver **Ardila**, 1979). Hoy la psicología comparada o psicología animal es una disciplina de grandes implicaciones (ver **Greenberg** y **Haraway**, 1998). Existe una International Society for Comparative Psychology (ISCP), cuyo siguiente Congreso es en Buenos Aires en 2008 y numerosas asociaciones regionales y nacionales de psicólogos comparativos. Entre los problemas investigados se encuentran los siguientes: ecología animal, agresión, cognición, comunicación animal, migración de animales, cortejo, defensa, emocionalidad, selección de parejas, conducta materna y paterna, juego, crianza de los hijos, solución de problemas, moral, altruismo, "teoría de la mente", concepto de número, concepto de tiempo.

Detallaremos algunos ejemplos de la investigación contemporánea sobre procesos psicológicos superiores en animales no humanos.

Lenguaje

La comunicación animal, los problemas metodológicos relacionados con su estudio científico, las diferentes perspectivas de pesquisa, tanto en monos superiores, como en otros primates, en aves, en delfines, en insectos, en especies domésticas, y tanto en el ambiente natural como en el laboratorio, constituyen uno de los hitos de la investigación contemporánea en psicología. (**Ardila**, 1993; **Washburn**, 2007).

El primer procedimiento experimental consistió en llevar a cabo registros de las vocalizaciones emitidas espontáneamente por los animales (delfines, chimpancés). Se grabaron estos sonidos y se presentaron más tarde a otros miembros de la misma especie. Se registraron las reacciones de los "oyentes" ante dichos sonidos. En esta forma se lograron aislar varios sonidos o fonemas que podían ser "comprendidos" por los miembros de la especie y que podrían ser análogos a las palabras o frases que utilizan

los seres humanos. Fonemas, cadenas de sonidos, ritmos sonoros, etc., se estudiaron en este contexto.

Igualmente los movimientos asociados con vocalizaciones y señales de amenaza, de agresión, de acercamiento, de protección, de rechazo. En chimpancés, orangutanes, bonobos, gorilas, mandriles, las vocalizaciones estaban muy ligadas a movimientos y a actividad motora general y específica.

También se trató de entrenar a los animales a emitir sonidos humanos y a entender los que producían las personas. Otra línea de investigación que fue mucho más promisorio consistió en entrenar a chimpancés (*Pan troglodytes*) a usar el lenguaje de signos que usan los sordos (American Sign Language). Y otra más consistió en aprender a utilizar símbolos arbitrarios para comunicar ideas que iban de lo simple a lo complejo, como colocar triángulos, cuadrados, dodecaedros y otras formas geométricas sobre un tablero magnético. Los chimpancés y otros primates no humanos aprendieron a comunicarse en forma muy efectiva por estos medios.

El lenguaje posee varios aspectos: fonología (sonidos), sintaxis (estructura), semántica (significado) y pragmática (utilización). Los animales estudiados en cuanto a comunicación son más o menos eficientes en uno o varios de estos aspectos. Delfines, hormigas, abejas, monos rhesus, perros, chimpancés, bonobos (*Pan paniscus*), orangutanes, gorilas, otros monos superiores, loros, tienen diferente nivel de eficacia en estos diferentes aspectos. La comunicación animal es hoy un campo de investigación en rápido crecimiento y que ha arrojado luces de gran importancia sobre asuntos centrales del lenguaje y del pensamiento: aquello que se suponía nos hacía auténticamente humanos. También compartimos muchos de estos aspectos con otras especies.

Cognición Matemática

Otro importante problema a investigar consistió en averiguar si los animales no humanos son capaces de contar, de realizar operaciones matemáticas, si poseen la habilidad para entender la numerosidad. En sus comienzos las descripciones anecdóticas abundaron y fueron refutadas por estudios controlados, con observadores independientes, capacidad de replicación y generalización, y teniendo en cuenta todas las exigencias de la investigación científica más rigurosa. El caso del "Clever Hans" un caballo que en apariencia contaba pero que en realidad lo que hacía era observar a su entrenador, fue una señal de alarma para los investigadores. El Cónon de **Lloyd Morgan**, (1894) de no atribuir a los animales habilidades mentales superiores si

el comportamiento observado podía atribuirse a habilidades mentales que se encontraban en niveles inferiores en la “escala psicológica”, tuvo gran influencia.

Pero las investigaciones controladas sobre capacidades numéricas en animales no humanos han demostrado que las habilidades matemáticas no son exclusivas de nuestra especie. Se entrenó a palomas a comer solamente un número específico y determinado de arvejas (5) de un recipiente (ver **Rilling**, 1993). En otro estudio se reforzó a ratas por presionar una palanca A con regularidad de 4, 8, 12, 16 respuestas y luego presionar una palanca B. Se ha entrenado a varias especies de animales a elegir entre dos conjuntos de elementos con base en sus diferencias cuantitativas relativas. En varias especies se han encontrado procesos enumerativos análogos al proceso de contar en los seres humanos. Las especies investigadas han sido muchas: chimpancés, macacos rhesus, monos ardilla, palomas, orangutanes, gorilas, bonobos, loros. En las investigaciones controladas se ha encontrado que los animales evaluaban los conjuntos de estímulos con base en su numerosidad exacta.

Entre los estudios más interesantes se encuentran aquellos en los cuales un animal (por ejemplo un chimpancé, o un mono rhesus) aprendía a identificar números arábigos (1, 2, 3, etc.) y a elegir en una pantalla de computador el número de elementos que correspondía a dicho número (3 bolitas, 4 bolitas, etc.). Movía los elementos con un cursor y lo hacía correctamente. También construía series de objetos y les adjudicaba numerales. Los experimentos se clasificaron en aquellos que se referían a enumeración constructiva y los relacionados con enumeración responsiva. En todo caso estos animales eran capaces de mover los elementos (por ejemplo bolitas en la pantalla de un computador) para hacerlas corresponder a un número arábigo (ver una revisión sobre estos temas de las habilidades matemáticas de los animales en **Beran, Gulledge & Washburn**, 2007).

Es importante señalar que los animales, por ejemplo chimpancés, tenían facilidad para realizar estas tareas matemáticas con elementos que variaban de 1 a 10 elementos, y que las tareas se resolvían más fácilmente entre más diferentes fueran los elementos (3 bolitas versus 7 bolitas, se seleccionan fácilmente, no así cuando había que elegir entre 9 y 10 bolitas). También que se requerían centenares de ensayos para lograr la habilidad y demostrar estas capacidades de contar y en general de numerosidad.

En algunas tareas los animales resolvían problemas más allá de su nivel de entrenamiento, o sea que generalizaban y organizaban materiales, reglas, símbolos, que no

estaban presentes. La “mente” de los chimpancés no parece ser tan primitiva como se creía antes. La capacidad numérica no parece ser exclusiva de la especie humana.

Conciencia

¿Poseen los animales conciencia de sí mismos? ¿Es la conciencia exclusiva de los seres humanos o se extiende a otros primates, o incluso a otras especies? Este problema se ha estudiado en relación con el reconocimiento de nombres, seguimiento de órdenes y ante todo con el reconocimiento de imágenes en espejos

En los experimentos sobre uso de espejos por parte de chimpancés, se encontró que ellos los utilizaban para explorar su propio cuerpo, incluyendo partes del mismo que no son visibles sin la ayuda de un espejo manual. **Gallup** (ver por ejemplo 1977, 1985) es el investigador que originó este campo de estudio de la cognición animal. En estudios controlados con chimpancés y otras especies de primates no humanos, encontró que utilizaban los espejos para explorar su cuerpo, las marcas dejadas en lugares no visibles, etc. **Gallup** afirmó que los animales se reconocían a sí mismos, tenían conciencia de ellos mismos, poseían identidad, conciencia del yo, y la habilidad de pensar acerca de los procesos de pensamiento.

Esta habilidad existe en pocas especies: chimpancés, macacos rhesus, orangutanes y gorilas, y otras más. Un importante estudio sobre conciencia en animales puede encontrarse en **Pérez-Acosta, Benjumea y Navarro** (2001). Ellos señalan que:

“Una gran parte de la comunidad científica y filosófica asume que la autoconciencia es una capacidad que se restringe a los seres humanos o, siendo generosos, al hombre y a los grandes monos antropomorfos. Pero una serie de hallazgos experimentales han llevado a varios científicos del comportamiento... a la conclusión de que la autoconciencia no es exclusivamente humana. Los resultados empíricos de estos estudios son, al parecer, incontestables. No obstante, ¿qué es lo que están mostrando los animales?... explicar la conciencia en términos de procesos o capacidades internas del individuo que la permiten autoconocerse (self, metamemoria, teoría de la mente, etc.)... varias especies han sido capaces de auto-discriminarse condicionalmente en varios aspectos como la propia imagen, estados inducidos por drogas; además de múltiples dimensiones de la propia conducta” (pp. 311-312).

Rutas y Planeación del Futuro

En el cerebro existen áreas que tienen que ver con los procesos mentales superiores, entre otros la planeación

del futuro. También se encuentran en animales superiores. La capacidad de entender las relaciones entre los fenómenos, las consecuencias de los actos, a corto, mediano y largo plazo, no es exclusiva de nosotros. Es posible que la percepción del tiempo en contextos muy amplios, en escalas temporales muy grandes, no se encuentre dentro de los límites cognitivos que impone la corteza cerebral de otras especies.

Juicio Moral

Que los animales fueran capaces de realizar actos análogos a los juicios morales que realizamos los seres humanos, es algo que extrañó a muchos. En la cultura occidental la moralidad se considera racional, y su análisis se basa en gran parte en las ideas de **Platón** que postulaba la moral como racionalidad. Se asume que la diferencia entre el bien y el mal que las personas aprenden en todas las culturas se fundamenta en las enseñanzas recibidas en el hogar y en la escuela, en las leyes, y en las normas de las distintas religiones. Haber encontrado que las raíces de la moralidad se hallan en los animales no humanos, es asunto reciente.

Los trabajos de **Frans de Waal**, un destacado primatólogo y más recientemente de **Marc D. Hauser**, psicobiólogo, han brindado una nueva perspectiva sobre conductas altamente complejas en animales, ante todo en primates no humanos (chimpancés, bonobos, gorilas, orangutanes, mandriles).

De hecho, **Darwin** estableció la continuidad entre evolución y moralidad y presentó una concepción no egoísta de la simpatía. Existe simpatía en los animales. Hoy sabemos que hay cooperación, reciprocidad y altruismo de grupo. Las ideas de **Huxley** no fueron exactamente iguales a las de **Darwin** sobre estos temas de moralidad y evolución, y más adelante fueron re-analizadas por **Myers**. Todos ellos y recientemente de **Waal** y **Hauser**, se interesaron por estudiar el juicio moral en especies diferentes de la nuestra.

De hecho, la evolución favorece a los animales que se ayudan unos a otros, si al hacer esto logran beneficios a largo plazo. Dichos beneficios son más grandes a los que se encuentran al competir con los demás y actuar por su cuenta buscando el beneficio individual. La cooperación se diferencia de la reciprocidad, porque la primera conlleva beneficios simultáneos para ambas partes, mientras que la reciprocidad conlleva actos de intercambio que son beneficiosos para el receptor pero que resultan costosos para el agente. El altruismo es costoso y sus beneficios son a largo plazo, no inmediatos.

Los sentimientos de empatía y las expectativas de reciprocidad son conductas esenciales en la vida de los grupos de mamíferos y se pueden considerar como contraparte de la moralidad humana. **Marc D. Hauser** (2006) propuso que las personas nacen con una “gramática moral” estructurada en sus circuitos neurales por la evolución. Esta gramática genera juicios morales instantáneos, que escapan de la conciencia debido a que en ocasiones es preciso tomar decisiones morales instantáneas, especialmente en situaciones de vida o muerte. Como nacemos con esta gramática moral, instalada por la evolución, en realidad los padres y maestros no enseñan a los niños reglas de conducta sino que moldean una conducta que es innata. Esta gramática moral sería análoga a la “gramática universal” propuesta por **Chomsky**, y que es también un concepto discutido y controvertido.

La gramática moral (**Hauser**) es un sistema para generar conducta moral y no es una lista de reglas específicas. Construye en forma tan amplia la conducta humana que muchas reglas son las mismas (o son muy similares) en todas las culturas: no debemos matar, debemos cuidar a los niños y a los débiles, no debemos robar, mentir ni engañar, debemos evitar el adulterio. Esta moral universal permite variaciones, que podemos encontrar en las distintas evaluaciones culturales del infanticidio, la pena de muerte, el aborto, la eutanasia.

La razón por la cual apareció en la evolución esta gramática moral se debe a que la vida social requiere límites, un cierto orden y por lo tanto las limitaciones a la conducta social han sido favorecidas por la selección natural debido a su valor para la supervivencia.

Los animales no humanos (sociales) poseen un sistema moral rudimentario que da cuenta de las desviaciones a las conductas esperadas.

Transmisión de Cultura

La cultura se consideró que era la diferencia más importante entre los seres humanos y los demás animales: la modificación del ambiente para adaptarlo a nuestras necesidades, y que incluía tanto la cultura objetiva como la cultura subjetiva. Sin embargo esta diferencia tampoco se mantiene: muchas especies animales tienen cultura, los miembros aprenden unos de otros, transmiten innovaciones culturales de una generación a otra.

En monos superiores se ha encontrado uso de instrumentos, elaboración de instrumentos y modificación de los mismos para solucionar problemas. Los estudios pioneros de **Köhler** a comienzos del siglo XX han avanzado enormemente en las últimas décadas. Se destacan los tra-

bajos realizados en el Instituto de Investigación de Primates en Kyoto (Japón) que durante más de 50 años ha estudiado transmisión cultural en monos, y también lenguaje y el concepto de número. Igualmente se han llevado a cabo investigaciones “de punta” sobre transmisión cultural en animales no humanos en Georgia State University (Atlanta, Georgia, USA), en el Yerkes National Primate Research Center (Emory University), en el Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva (Leipzig, Alemania) y muchos otros centros de investigación de diversos países, en Rusia, en Holanda, en Alemania y en varias naciones latinoamericanas destacándose Brasil y México.

Van Schaik (2006) señala que los animales sociales han desarrollado tanto sus habilidades cognitivas porque los más inteligentes tienen más posibilidades de realizar elecciones adecuadas y por lo tanto de sobrevivir y de transmitir sus genes a la siguiente generación. Se afirma que los animales aprenden unos de otros, imitan a los congéneres en la invención de instrumentos (por ejemplo para recoger hormigas y termitas, miel, para abrir frutos duros, para solucionar otros problemas cognitivamente complejos). La tendencia a la innovación y el aprendizaje social han co-evolucionado.

Diversas poblaciones de chimpancés en su hábitat natural han desarrollado pautas comportamentales, algunas de las cuales se transmiten socialmente a lo largo de las generaciones. Esto ha llevado a investigadores a afirmar que los chimpancés, al igual que los seres humanos, viven dentro de una cultura. El punto central de discusión es si las versiones de cultura de los chimpancés y de los seres humanos son similares o diferentes.

Personalidad

La psicología estudia la personalidad como diferencias individuales. Los seres humanos tenemos mucho en común, pero también rasgos y pautas de conducta que son diferentes en distintos grupos y en distintas personas. Personalidad e individual son dos conceptos bastante cercanos, sin que se puedan confundir.

El estudio de la personalidad de los animales nos ha demostrado que no todos los animales son iguales, dentro de la misma especie y raza. No todos los perros son iguales ni lo son los monos. Estudios sistemáticos sobre personalidad de los monos superiores utilizando pruebas análogas a las que se usan para estudiar la personalidad humana, han encontrado diferencias en sociabilidad, impulsividad, introversión-extraversión, persistencia y motivación, habilidades cognitivas, relaciones de altruis-

mo, cooperación y simpatía, entre los distintos individuos (ver **Santillán-Doherty et al.**, 2002, 2004) “No todos los hombres han sido creados iguales”... Tampoco lo han sido los monos ni otros animales.

Conclusiones

Los anteriores ejemplos de habilidades superiores en animales no humanos los hemos presentado para señalar que los procesos psicológicos se encuentran en muchas especies y no solo en el *Homo Sapiens*. De hecho las diferencias entre nuestra especie y las demás es un asunto de grado, no solo a nivel biológico sino también a nivel psicológico y social. Existe una continuidad en procesos psicológicos en las diversas especies, sin que esto implique que haya ninguna jerarquía ni ningún proceso de complejización ni dirección alguna (conciente o planificada) en la evolución de las especies.

La especie humana es una más, que ha sido muy exitosa y ha extendido su rango de acción por todo el planeta (y pronto por los planetas cercanos) y ha logrado entender el mundo – físico, biológico, psicológico, social, aunque sea parcialmente – más que cualquier otra especie. El método más eficiente para entender el mundo ha sido el método de la ciencia. Pero no somos los únicos y en realidad los procesos psicológicos han tenido un largo proceso de evolución filogenética hasta llegar al punto donde se encuentran ahora. La cultura, el lenguaje, la moral, la matemática, la personalidad, la organización social, la planeación del futuro no son exclusivas de nuestra especie. Es claro que hemos avanzado mucho más que cualquier otra especie y que las diferencias cuantitativas con nuestros primos en el reino de la vida son grandes y parecería que fueran cualitativas, pero son en realidad diferencias cuantitativas, diferencias de grado.

Podemos preguntarnos cuáles elementos de la psicología humana han cambiado desde que los seres humanos nos separamos de otros grupos de primates como los chimpancés y los bonobos (que son nuestros “primos”, no nuestros antepasados), y cuáles son los procesos por medio de los cuales evolucionaron (o sea cuáles fueron las presiones de selección). Qué parte de la mente humana es única y exclusiva de nuestra especie. Sin duda la gran flexibilidad de comportamiento que caracteriza a nuestra especie, presenta a la teoría evolucionista su reto más grande (**Hare**, 2007).

La psicología que inicia su recorrido como área de conocimiento con reflexiones filosóficas acerca de la psique, pasa luego a estudiar la mente y más tarde el comportamiento de los organismos, ha realizado significativos

aportes, brinda una perspectiva relevante, en el proceso de entender el mundo. La forma como percibimos, aprendemos, pensamos, actuamos, nos relacionamos unos con otros, nos peleamos y nos reconciliamos, nos organizamos socialmente, e incluso como llegamos a destruir nuestro hábitat y nuestro hogar planetario, ha arrojado muchas luces sobre la evolución.

La psicología ha utilizado el método de las ciencias naturales, es parte de la historia natural, además de ser una ciencia social y del comportamiento. Recordemos que:

“Los psicólogos trabajan en problemas que tienen que ver con la forma como conocemos el mundo, como aprendemos, como procesamos la información procedente del exterior, como nos comportamos, como nos relacionamos con las personas que son diferentes de nosotros, como enfrentamos nuestra propia existencia, los valores, el juicio moral, la justicia, la conducta desviada de la norma, el mundo del trabajo, el ocio, la vejez, la muerte. Son problemas de enorme importancia, acerca de los cuales existen muchas más preguntas que respuestas” (Ardila, 2002).

Referencias

- Ardila, R. (1977). *Investigaciones psicológicas*. Bogotá: Siglo XXI Editores.
- . (1979). *Los orígenes del comportamiento humano*. Barcelona: Editorial Fontanella.
- . (1993). El lenguaje de los monos superiores. *Innovación y Ciencia* (Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia), 2 (2): 44-49.
- . (2002). *La psicología en el futuro*. Madrid: Editorial Pirámide.
- . (2007). The nature of psychology: The great dilemmas. *American Psychologist*, 62.
- Beran, M. J., Gulledge, J. P., & Washburn, D. A. (2007). Animals count: What is next? Contributions from the Language Research Center to nonhuman animal numerical cognition research. In D. A. Washburn (Ed.), *Primate perspectives on behavior and cognition* (pp.161-173). Washington, D.C.: American Psychological Association.
- Buss, D. M. (1999). *Evolutionary psychology. The new science of the mind*. Boston: Allyn & Bacon.
- Darwin, C. R. (1859). *The origin of species by means of natural selection*. London: Murray (Edition: The Modern Library, New York).
- . (1871). *The descent of man and selection in relation to sex*. London: Murray.
- . (1872). *The expression of the emotions in man and animals*. London: Murray.
- De Waal, F. (2006). *Primates and philosophers, how morality evolved*. Princeton: Princeton University Press.
- Gallup, G. G. (1977). Self-recognition in primates. A comparative approach to the bidirectional properties of consciousness. *American Psychologist*, 32: 329-338.
- . (1985). Do mind exists in species other than our own? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 9: 631-641.
- Greenberg, G., & Haraway, M. M. (Eds.). (1998). *Comparative psychology. A handbook*: New York: Garland Publishers.
- Hare, B. (2007). From nonhuman to human mind: What changed and why?. *Current Directions in Psychological Science*, 16 (2): 60-64.
- Houser, M. D. (2006). *Moral minds*. New York: HarperCollins.
- Morgan, C. L. (1894). *Introduction to comparative psychology*. London: Scott.
- Papini, M. R. (2002). *Comparative psychology Evolution and development of behavior*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Pérez-Acosta, A. M., Benjumea, S., y Navarro, J. I. (2001). Autoconciencia animal: estudios sobre autodiscriminación condicionada en varias especies. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 33: 311-327.
- Rilling, M. (1993). Invisible counting animals: A history of contributions from comparative psychology, ethology, and learning theory. In S. T. Boyson & E. J. Capaldi (Eds.), *The development of numerical competence: Animal and human models –Comparative cognition and neuroscience*. (pp. 3-38). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Russell, B. (1921). *The analysis of mind*. London: Allen & Unwin.
- Santillán-Doherty, A.M., Mayagoitia, L., Kajihara, K., Mendoza, M., y Muñoz-Delgado, J. (2002). Estudio longitudinal de la personalidad en primates no humanos. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 34 (3): 241-249.
- , Muñoz-Delgado, J., y Nicolani, H. (2004). La medición de la personalidad en primates no humanos. *Salud Mental (México)*, 27 (1): 50-59.
- Thorndike, E. L. (1909). Darwin's contributions to psychology. *University of California Chronicle*, 12: 65-80.
- Van Schaik, C. (2006). Why are some animals so smart? *Scientific American*, April 2006, 49-55
- Washburn, D. A. (Ed.). (2007). *Primate perspectives on behavior and cognition*. Washington, D.C.: American Psychological Association.

Recibido: septiembre 12 de 2007

Aceptado para su publicación: septiembre 21 de 2007

USO DE MÉTODOS QUÍMICOS EN LA OBTENCIÓN DE SnO₂ EMPLEADO COMO SENSOR DE GASES

Por

A. Montenegro^{1*}, M. Ponce², M. S. Castro², J. E. Rodríguez-Páez¹

Resumen

Montenegro A., M. Ponce, M. S. Castro, J. E. Rodríguez-Páez: Uso de métodos químicos en la obtención de SnO₂ empleado como sensor de gases. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 405-413, 2007. ISSN 0370-3908.

En este trabajo se sintetizaron polvos cerámicos pertenecientes al sistema SnO₂-Bi₂O₃, a través de los métodos de precipitación y precursor polimérico (Pechini). Estos métodos permitieron obtener partículas nanométricas, con alta pureza química. Los polvos obtenidos se caracterizaron utilizando análisis térmico (ATD/TG), Difracción de Rayos X (DRX), distribución de tamaño de partícula y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Con el fin de determinar su comportamiento como sensor, con los polvos sintetizados se conformaron películas gruesas sobre sustratos de alúmina a través de la técnica de "screen printing". Se determinó la variación temporal de la resistencia eléctrica del sensor al cambiar la atmósfera de vacío a oxígeno o de vacío a monóxido de carbono. Se determinó la sensibilidad y estabilidad del sensor de gas.

Palabras clave: Sensor de gas, Síntesis, SnO₂ - Bi₂O₃, precipitación, precursor polimérico.

Abstract

In this work, SnO₂-Bi₂O₃ ceramic powders were synthesised through precipitation and polymeric precursor (Pechini) methods. Through these methods, high purity nanometric particles were obtained. Powders were characterised through Simultaneous Gravimetric and Differential Thermal Analyses (DTA/TG), X-Ray Diffraction (XRD), particle size distribution and Scanning Electron Microscopy (SEM). Then, employing the synthesised powders thick films were conformed and their electrical behaviour was determined. Time response of the sensor electrical resistance when the atmosphere is changed from vacuum to oxygen or to carbon monoxide was registered. Also, the sensitivity and stability of the sensor were determined.

Keywords: Gas sensor, synthesis, SnO₂ - Bi₂O₃, precipitation, polymeric precursor.

¹ 1 Grupo CYTEMAC. Departamento de Física, Universidad del Cauca, Calle 5 N° 4-70 Popayán, Colombia

² Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales, INTEMA, Mar del Plata, Argentina.

* Correo electrónico: amontenegro@unicauca.edu.co

1. Introducción

El óxido de estaño, SnO_2 , es un material semiconductor transparente con gran estabilidad química y mecánica. Sólo tiene una fase estable que presenta una estructura cristalina tetragonal tipo rutilo (**Jarzebski J. M. et. al.** 1976). Los parámetros de red son $a = 4.737 \text{ \AA}$ y $c = 3.186 \text{ \AA}$. Su densidad es 6.95 g cm^{-3} y su punto de fusión de 1630°C (**Bernardi M.I.B. et. al.** 2002). Esta estructura cristalina contiene átomos metálicos en coordinación octaédrica y oxígeno en coordinación planar. El óxido de estaño es un semiconductor tipo n debido a la existencia de niveles donores que se atribuyen generalmente a la simple y doble ionización de las vacancias de oxígeno (**Delgado R.** 2001). La sensibilidad de los sensores basados en óxido de estaño cuando son expuestos a gases reductores es el resultado de una reacción química del oxígeno quimisorbido, con gases como el hidrógeno, monóxido de carbono o los hidrocarburos (**Sze S.M.** 1997,). El oxígeno ionizado, adsorbido en la superficie, toma electrones de la banda de conducción del óxido de estaño ocasionando la disminución de su densidad de carga electrónica y por lo tanto de su conductividad (**Serrini P.** 1997, **Madau M.J. et. al.** 1989).

Otro aspecto que condiciona la conductividad eléctrica, para el caso de un semiconductor tipo n, son las fronteras de grano en las muestras tratadas térmicamente; en esta región la posición del nivel de Fermi debe ser menor que la que tiene normalmente en el 'bulk' del material. Cuando el SnO_2 es expuesto a una atmósfera de gas, a temperatura moderada, pueden ocurrir dos procesos: (1) adsorción de moléculas del gas debido a la gran reactividad de la superficie del SnO_2 y/o (2) reacción de las moléculas de gas con las moléculas quimisorbidas en la superficie del óxido (**Huamán F. et. al.** 1998, **Ponce M. A.** 2003, **Barsan N. et. al.** 2001).

Las propiedades eléctricas de los cerámicos policristalinos de SnO_2 dependen del método de preparación del polvo cerámico, de la temperatura y de la atmósfera utilizada para el tratamiento térmico. La síntesis de los polvos cerámicos de SnO_2 , puro o dopado, se ha realizado a través de métodos como: sol-gel, coprecipitación de oxalatos o hidróxidos, precursor polimérico, reacciones en estado sólido a través de la descomposición de carbonatos, deposición en fase vapor y la oxidación de SnO (a) a SnO_2 por crecimiento epitaxial (**Giuntini J.C. et. al.** 1990, **Leite E.R. et.al.** 2002).

A pesar que los sensores de gases basados en SnO_2 se encuentran muy comercializados aún es necesario mejorar el comportamiento de los mismos (**Liu F. et. al.** 2004).

Uno de los parámetros a mejorar es la estabilidad de la resistencia del sensor a largo tiempo para una concentración constante de gas; para ello se viene realizando un gran trabajo incorporando dopantes adecuados a los polvos de SnO_2 (**Schweizer-Berberich M. et. al.** 1996, **Radecka M. et. al.** 1998, **Liu F. et. al.** 2004).

Por otro lado, el óxido de bismuto en fase estable es un semiconductor tipo p, y se ha utilizado en la detección de humo (**Aroutionian V.M. et. al.** 1995, **Adamian Z.N. et. al.** 1996), adicionándole otros óxidos semiconductores mejora el sensado de CO y también se utiliza para el sensado de NO y H_2 (**Sberveglieri G. et. al.** 1992, **Devi G.S. et. al.** 1999).

En este trabajo se utilizaron dos métodos de síntesis para obtener polvos cerámicos del sistema $\text{SnO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$: coprecipitación y precursor polimérico (Pechini). Se conformaron películas gruesas con los polvos cerámicos y se determinó la variación de la resistencia eléctrica de las mismas al colocarlas en presencia de atmósferas de O_2 y CO. Con base en estos últimos resultados se pudo conocer la sensibilidad y estabilidad de este sistema $\text{SnO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ como sensor de gas.

2. Parte experimental

2.1. Síntesis del sistema $\text{SnO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$, por coprecipitación

Las soluciones de los precursores de Sn y Bi, elementos básicos del proceso de síntesis, se obtuvieron a partir del proceso experimental que se detalla a continuación. Se prepararon separadamente soluciones acuosas 0.3 M de Sulfato de estaño (SnSO_4 -Fisher Scientific 95%) y 0,1M de acetato de bismuto ($\text{Bi}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3$ -Aldrich 99.99%) en presencia de ácido nítrico (HNO_3 -Carlo Erba 99%). Las soluciones se agitaron continuamente a 200 r.p.m., a temperatura ambiente, hasta que no se observaron partículas de los precursores en suspensión. Luego se adicionó, mediante un dosificador (Metrohm Dosimat 685), hidróxido de amonio (NH_4OH -Mallinckrodt 28%) a una velocidad de 0.034 ml/seg. (0,5 ml cada 15 seg.). A fin de obtener las curvas de valoración potenciométrica, se registró la variación del pH del sistema (pH-metro Metrohm 744) a medida que se adicionó el NH_4OH a los sistemas. El pH del sistema se graficó en función del volumen adicionado de precipitante (NH_4OH). Las soluciones de estaño y bismuto obtenidas se mezclaron, en las composiciones indicadas en la Tabla I, a 4000 rpm durante 3 minutos utilizando un equipo de dispersión de alta cizalla (Ultraturrax Marca IKA. Mod. T-50).

La suspensión obtenida se dejó envejecer 24 horas a temperatura ambiente y luego se filtró al vacío para eliminar gran parte del volumen del solvente del sistema. El sólido húmedo se redispersó en 200 ml de agua destilada utilizando el equipo de dispersión. La suspensión obtenida se dejó reposar durante 24 horas; este proceso se repitió dos veces más y al final el producto obtenido se secó en una estufa a 60 °C durante 12 horas. El sólido resultante del secado se maceró utilizando un mortero de ágata.

2.2. Obtención de los polvos cerámicos de SnO₂-Bi₂O₃ mediante el método de precursor polimérico (Pechini).

Para obtener el polvo cerámico por el método Pechini, inicialmente se calentaron 59,11 ml de etilenglicol (Mallinckodt 99.5%) a 70°C y se le adicionó lentamente 52,54 g. de ácido cítrico (Carlo Erba 99%) manteniendo constante la temperatura del sistema a 70°C, y agitando continuamente la mezcla, hasta obtener una solución transparente. Por separado se preparó una solución acuosa 0,1M de acetato de bismuto (Bi (C₂H₃O₂)₃-Aldrich 99.99%), adicionándole ácido nítrico (HNO₃-Carlo Erba %). A la mezcla de etilenglicol y ácido cítrico se le adicionaron el sulfato de estaño y la solución del precursor de bismuto para obtener el sistema SnO₂-Bi₂O₃ con las composiciones indicadas en la Tabla 1.

Cuando la mezcla de los precursores con el etilenglicol y el ácido cítrico quedó totalmente transparente, se redujo la temperatura a 25°C y se comenzó a adicionar NH₄OH hasta llevar la solución a un pH de 9. Una vez alcanzado el pH final, garantizando que no se había formado ningún precipitado en el sistema, se calentó la solución a 140°C, en agitación constante, hasta que se formó una resina de color negra. La resina obtenida se calcinó a 350°C y el sólido resultante de esta pre-calcinación se maceró utilizando un mortero de ágata.

2.3. Caracterización de los polvos cerámicos obtenidos

Los polvos obtenidos, tanto por coprecipitación como por Pechini, fueron caracterizados inicialmente utilizando Análisis Térmico Diferencial (ATD) (DTA-50 Shimadzu) en una atmósfera de aire seco con flujo de 7 l/min., a una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Con esta técnica se determinaron las temperaturas donde ocurren los principales cambios de fase, descomposición de la fase orgánica y los procesos de cristalización; a partir de estos resultados se definió la temperatura a la que se deben someter los polvos cerámicos obtenidos a través de las rutas

Tabla 1. Concentración de óxido de estaño y bismuto para obtener las muestras.

Método de síntesis	% en moles de óxido de Bi	% en moles de óxido de Sn
Precipitación	0.5	99.5
Precipitación	1	99
Pechini	0.5	99.5
Pechini	1	99
Pechini	3	97

químicas utilizadas con el objetivo de obtener solo las soluciones sólidas de SnO₂ – Bi₂O₃.

La determinación de las fases cristalinas presentes en los polvos se realizó mediante difracción de rayos X (DRX); el equipo que se utilizó fue un difractómetro marca Philips, utilizando la radiación del Co ($\gamma=1,790\text{Å}$). La distribución de tamaño de partícula de los polvos cerámicos sintetizados se determinó utilizando un equipo Micromeritics Sedigraph 5000D y el tamaño y morfología de las partículas se definieron empleando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) (Jeol 6460 LV).

2.4. Preparación de los dispositivos

Para la conformación de las películas gruesas se utilizaron sustratos de alúmina a lo que previamente se les depositaron electrodos interdigitales de oro mediante desputtering. Sobre estos sustratos se depositaron los polvos cerámicos de dióxido de estaño dopados con bismuto mediante la técnica de “*screen printing*”. Una vez depositadas, las películas fueron calcinadas a 500°C durante 2 horas. Luego, se extrajeron las películas y se las dejó enfriar a temperatura ambiente.

Posteriormente, se realizaron las determinaciones de la variación de la resistencia eléctrica al cambiar la atmósfera de vacío (10⁻⁴ mmHg) a oxígeno (40 mmHg) y de vacío (10⁻⁴ mmHg) a CO (40 mmHg) a 250°C y 350°C. Para ello, se realizó vacío en la celda para permitir la desorción de gases y luego se permitió el ingreso de los gases, oxígeno o CO; Las medidas se llevaron a cabo hasta que los valores de resistencia alcanzaron un valor estable. Luego se realizó vacío y se continuó con la toma de datos correspondiente.

3. Resultados y discusión

3.1. Valoración potenciométrica

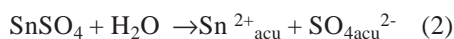
La curva de valoración potenciométrica de la figura 1, obtenida para una disolución 0.3M de SnSO₄ y 0.1 de HNO₃ al adicionar el agente precipitante (NH₄OH), presenta 4 regiones bien definidas si se considera la varia-

ción de la pendiente de la curva; mientras la región A presenta una variación apreciable en el valor de pH la B es prácticamente plana, indicando un alto consumo de OH^- por parte del sistema. La región C muestra un cambio abrupto de la pendiente de la curva mientras en D el valor de la pendiente es muy pequeño y corresponde a la saturación de la disolución.

Al disolver SnSO_4 en agua se presenta una disociación parcial del precursor que se puede representar a través de una reacción del siguiente tipo:



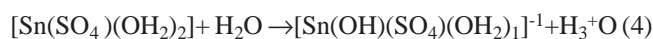
Por otro lado considerando la posible disociación completa de una porción del precursor, la siguiente reacción tendría lugar:



que produciría el complejo acuo de estaño, el cual podría seguir reaccionando con el agua a través de reacciones de hidrólisis expresadas por:



Adicional a la reacción anterior puede ocurrir hidrólisis espontánea de la especie sulfatada, producto de reacción 1, y que se puede expresar así:



obteniéndose como productos protones, H_3^+O , los cuales disminuyen el pH del sistema. Por otro lado, si observamos la figura 1, en el segmento A de la curva donde se observa un leve incremento en el valor del pH, se debe presentar

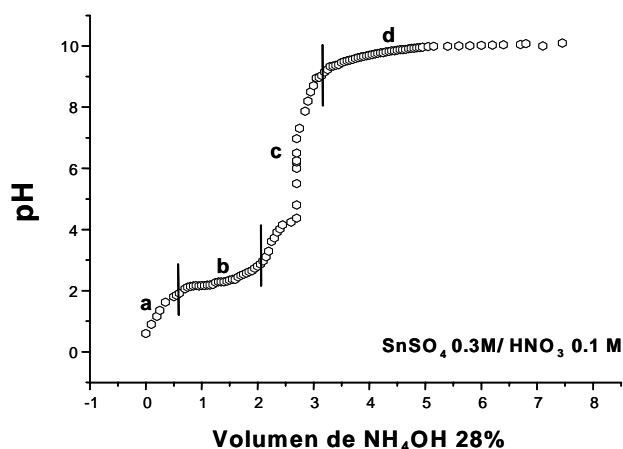
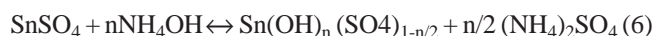


Figura 1. Curva de Valoración potenciométrica del sistema SnSO_4 0.3M / HNO_3 0.1M.

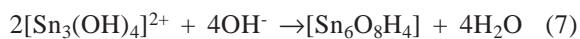
principalmente la neutralización del HNO_3 por el NH_4OH que se adiciona, mediante la siguiente reacción:



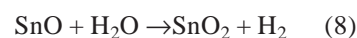
produciéndose nitrato de amonio. Además se pueden conformar sulfatos básicos de estaño a través de la siguiente reacción:



En el Segmento B, donde no se observa un cambio apreciable del pH, ocurre un alto consumo de OH^- suministrado por el NH_4OH . En esta zona de la curva debe presentarse, principalmente, la formación de especies polinucleares del tipo $[\text{Sn}_2(\text{OH})_2]^{2+}$, $[\text{Sn}_3(\text{OH})_4]^{2+}$ y $[\text{Sn}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4]$, etc., como resultado del desarrollo de las reacciones de condensación que experimentan las especies de estaño hidrolizadas. Los complejos tipo oxi-hidroxo que se pueden formar en esta región presentan una composición cercana a $3\text{SnO} \cdot \text{H}_2\text{O}$, los cuales contienen agrupaciones de poliedros Sn_6O_8 que se unen entre sí por enlaces de hidrógeno dando como resultado una fórmula estructural $\text{Sn}_6\text{O}_8\text{H}_4$, compuesto que puede formarse a partir de la siguiente reacción de condensación (Liu F. et. al. 2004):



Las especies polinucleares conformadas interactúan para formar los embriones y núcleos de la fase sólida. Luego, la casiterita (SnO_2) se produce a través de la siguiente reacción:



En el segmento C ocurre un incremento abrupto del pH; en esta región la formación de complejos, compuestos de estaño y núcleos de fase sólida debe disminuir notablemente.

En el segmento D, que corresponde a la saturación del sistema, los fenómenos más importantes deben ser el de redisolución de la fase sólida y la formación de aglomerados de partículas coloidales.

3.2. Análisis térmico diferencial (ATD) y análisis termogravimétrico (TG)

Con el fin de analizar el efecto de los tratamientos térmicos sobre las muestras obtenidas por los métodos de Precipitación Controlada y Pechini y poder determinar la temperatura más adecuada a la que hay que someter la muestra para obtener las soluciones sólidas $\text{SnO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ de interés, se realizaron ensayos de análisis térmico diferencial y análisis termogravimétrico.

En la Figura 2a se indican las curvas de ATD/TG de la muestra con 0,5% de Bi_2O_3 obtenida por precipitación controlada. En la curva de ATD se observa un pico endotérmico, asociado a una disminución en el peso de la muestra alrededor de 200°C , debido posiblemente a la descomposición de compuestos oxi-hidróxidos de estaño que se habrían conformado por la hidrólisis de las especies acu de este catión. Alrededor de los 300°C se observa un pequeño pico endotérmico, asociado a un aumento de peso, como lo indica la curva TG y que corresponde principalmente al cambio del estado de oxidación del bismuto pasando del Bi_2O_3 (Bi^{3+}) al Bi_2O_4 (Bi^{4+}) y la volatilización del NH_3 . A $\sim 400^\circ\text{C}$ se observa un gran pico exotérmico debido a la cristalización de la casiterita SnO_2 y conformación de las soluciones $\text{SnO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$. Algo similar se observa en las curvas ATD/TG de las muestras que contienen diferentes concentraciones de bismuto.

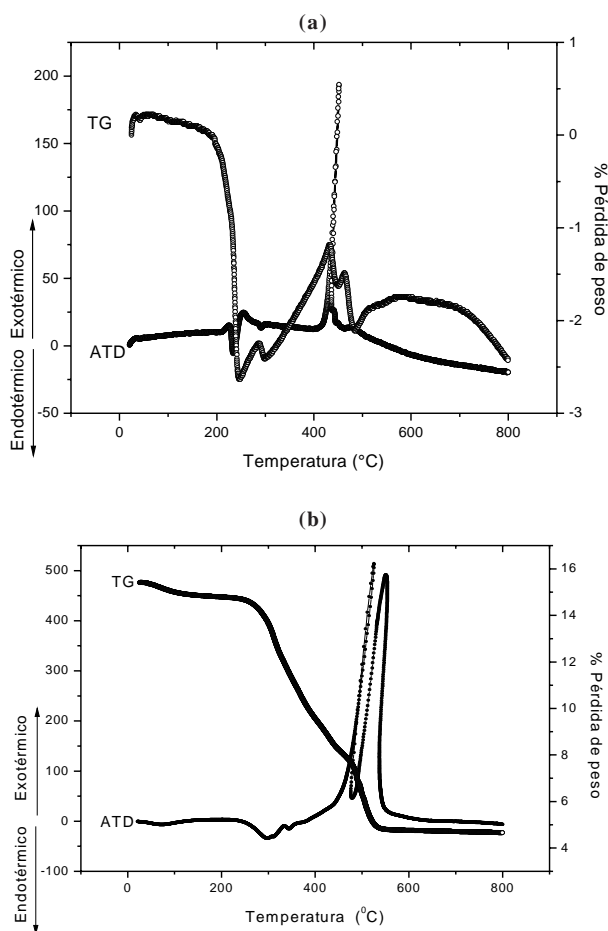


Figura 2. Curvas de ATD-TG de la muestra con 0,5% en moles de Bi, obtenida por el método de precipitación controlada (a) y el método Pechini (b).

Las curvas de ATD/TG para una muestra obtenida por Pechini se ilustran en la Figura 2b. A $\sim 300^\circ\text{C}$ comienza una gran pérdida de peso y se observa un pico endotérmico que puede representar el desprendimiento de agua y la volatilización de NH_3 por parte de la muestra. Los dos picos exotérmicos, que se presentan entre 450 y 550°C , indican la oxidación de la fase orgánica presente en la muestra y la cristalización del SnO_2 a partir de los oxicarbonatos de estaño; la gran pérdida de peso que presenta la muestra se debe a la gran cantidad de fase orgánica presente en ella y a su descomposición. Algo similar se observa para las muestras con diferentes concentraciones de bismuto.

3.3. Difracción de Rayos X (DRX)

Para identificar las principales fases cristalinas presentes en las muestras se utilizó la técnica de Difracción de Rayos X (DRX). Los difractogramas de rayos X correspondientes a los diferentes sistemas estudiados se muestran en las Figuras 3(a) y 3(b). Los difractogramas del sistema $\text{SnO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$, con 0,5% en moles de Bi_2O_3 , sintetizado por el método de precipitación controlada, sin y con tratamiento térmico a 600°C , se muestran en la Figura 3(a) En la muestra sin calcinar predomina la fase $\text{Sn}_3\text{O}(\text{OH})_2\text{SO}_4$. Difractogramas similares se registraron para las demás muestras con mayores contenidos de Bi_2O_3 .

En la Figura 3(b) se indican los difractogramas de rayos X correspondientes a muestras obtenidas por Pechini del sistema $\text{SnO}_2 - \text{Bi}_2\text{O}_3$ con 0,5% en moles de Bi_2O_3 , sin y con tratamiento térmico a 600°C . En la muestra sin tratamiento predomina la fase $\text{Sn}_3\text{O}(\text{OH})_2\text{SO}_4$. Estas mismas fases cristalinas están presentes en las demás muestras obtenidas mediante el método Pechini.

Los polvos obtenidos por ambos métodos de síntesis y calcinados a 600°C mostraron la presencia de SnO_2 y Bi_2O_4 . También se registró la aparición de un pequeño pico que se puede asignar a la fase Bi_2O_3 en las muestras preparadas por el método de coprecipitación.

3.4. Morfología y tamaño de partícula de los polvos cerámicos obtenidos.

Los estudios de distribución de tamaño de partícula, utilizando sedigrafía, indican que la muestra obtenida por precipitación controlada, y dopada con 1% en moles de Bi_2O_3 , presenta un valor medio de tamaño de partícula de $\sim 7 \mu\text{m}$ mientras que el 20% y 80% de la distribución tiene un tamaño de partícula entre $\sim 0,7 \mu\text{m}$ y $\sim 15 \mu\text{m}$, respectivamente. Algo similar se obtiene para la muestra de 3 % en moles de Bi_2O_3 : el valor medio de tamaño de partícula es de $\sim 6 \mu\text{m}$ mientras que el 20% y 80% de la distribución

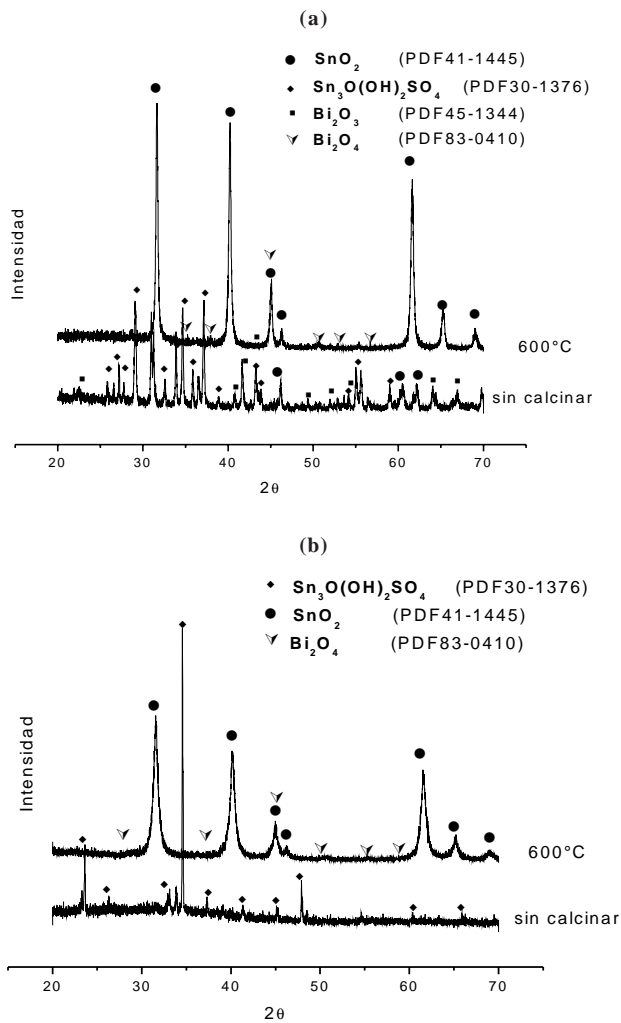


Figura 3. Difractogramas de Rayos X correspondientes a la muestra con 0,5% en moles de Bi sin calcinar y calcinada a 600°C, obtenida por el método precipitación controlada (a) y el método Pechini (b).

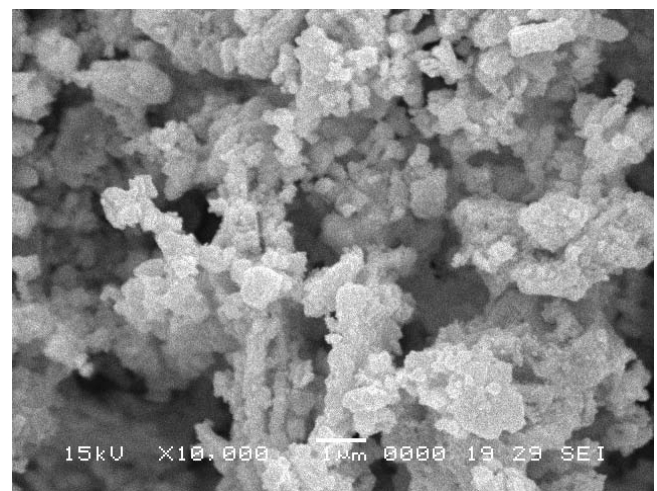
presenta un tamaño de partícula entre $\sim 0,8 \mu\text{m}$ y $\sim 14 \mu\text{m}$, respectivamente

La muestra obtenida por el método Pechini, y dopada con 1% en moles de Bi_2O_3 , presenta un valor medio de tamaño de partícula de $\sim 3 \mu\text{m}$ y el 20% y 80% de la distribución tiene un tamaño entre $\sim 0,2 \mu\text{m}$ y $\sim 13 \mu\text{m}$ respectivamente. Además, la muestra obtenida por precipitación controlada, sin dopante, presenta un valor medio de tamaño de partícula de $\sim 2 \mu\text{m}$ y el 20% y 80% de la distribución tiene un tamaño entre $\sim 0,7 \mu\text{m}$ y $\sim 13 \mu\text{m}$, respectivamente.

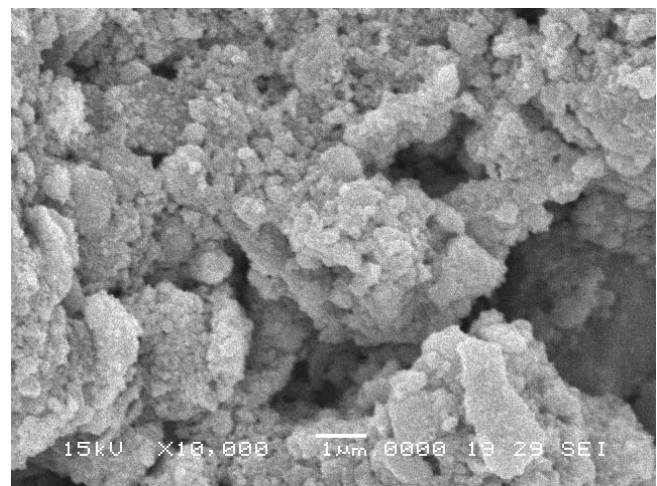
Los resultados anteriores indican que el ancho de la distribución de tamaño de partícula es bastante grande debido a la existencia de aglomerados, de diferentes

tamaños, por lo que los tamaños de partícula indicados anteriormente deben corresponder realmente al de los aglomerados, más que al de las partículas individuales, como se puede comprobar observando las imágenes de los polvos cerámicos obtenidos utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

La Figura 4 muestra las fotografías obtenidas con MEB de películas, con una concentración de 3% en moles de Bi_2O_3 , obtenidas por precipitación controlada, Figura 4(a), y por el método Pechini, Figura 4(b). Se observa que las muestras obtenidas por precipitación controlada presentan partículas con un tamaño mayor que las muestra obte-



(a)



(b)

Figura 4. Fotografías obtenidas con Microscopía electrónica de barrido, MEB, de las películas con 3% en moles de Bi, obtenidas por el método de precipitación controlada (a) y por el método Pechini (b); (Barra = 1 μm).

nidas por Pechini. Es evidente la presencia de aglomerados en las muestras independientemente del método de síntesis, y tienen una apariencia de mayor dureza los que se forman en el sistema sintetizado por Pechini (Figura 4(b)). Este problema de aglomeración es necesario corregirlo y para ello se puede utilizar molienda en atricción, para romper los enlaces entre partículas, o adicionar un surfactante al sistema, por ejemplo ácido oleico, que genere un efecto estérico e impida la unión entre ellas.

3.5. Caracterización eléctrica

Para determinar el comportamiento eléctrico de las películas gruesas se registró la variación de la resistencia de cada una de las muestras al exponerlas a una atmósfera de O₂ o CO, a temperatura constante. A partir de estos datos se determinaron los valores de sensibilidad de la muestra. La sensibilidad del sensor se determinó a partir del cociente entre la resistencia eléctrica en presencia del gas y la resistencia eléctrica en el vacío.

En la Figura 5(a), se muestran las curvas de resistencia que se obtienen al exponer a O₂ y CO películas gruesas del sistema Sn-Bi (conformadas con polvos sintetizados por coprecipitación controlada). En la Tabla 2 se presentan los datos de sensibilidad y tiempo de estabilización de las muestras estudiadas. De estos resultados se puede concluir que a mayor temperatura se favorece la difusión de oxígeno dentro de la película y aumenta la velocidad de respuesta del dispositivo. Al comparar los datos que reporta la literatura (Savala G. et al. 1999) con los valores de la Tabla 2 se puede concluir que a pesar de los altos valores de sensibilidad observados experimentalmente, la velocidad de respuesta del sistema es baja, comportamiento que se puede justificar considerando la presencia de aglomerados en la muestra.

Tabla 2. Sensibilidad y tiempo de respuesta en presencia de O₂ y CO, a 250° y 350°C, de películas gruesas del sistema Sn-Bi conformadas con polvos obtenidos por el método de precipitación controlada.

% en moles de Sb	Gas	R ₁ /R ₀ a 250°C	Tiempo (s)	R ₁ /R ₀ a 350°C	Tiempo (s)
0.5	O ₂	ND	-----	57	3552
	CO	8	182	5	12
1	O ₂	237	5900	215	4000
	CO	57	240	3	8
3	O ₂	ND	-----	ND	-----
	CO	2	170	3	18

ND: son valores que no se determinaron por tener un tiempo de estabilización superior a los 1000 s.

En la Figura 5(b), y en la Tabla 3, se muestran los resultados que se obtienen al someter películas gruesas del sistema Sn-Bi, conformadas con partículas sintetizadas por Pechini, a un tratamiento térmico a 350°C en presencia de O₂ o CO. Comparando las Tablas 2 y 3 se encuentra que la sensibilidad de las muestras sintetizadas utilizando el método Pechini es mas baja que en las películas conformadas con polvos obtenidos por el método de coprecipitación.

En un trabajo futuro es necesario estudiar con mayor detalle las características superficiales de las partículas utilizando XPS, ya que es allí donde ocurren los procesos más importantes para el sensado de los gases, y también

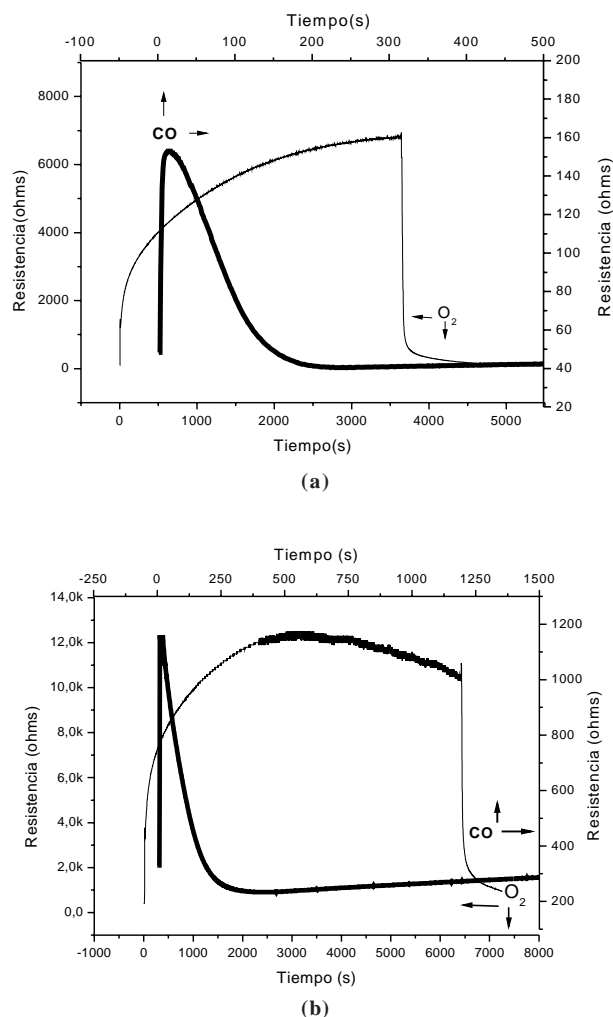


Figura 5. Curvas de resistencia en función del tiempo de exposición a una atmósfera de oxígeno y monóxido de carbono a 350 °C, correspondientes a la muestra con 0,5% en moles de Bi, obtenida por el método de precipitación controlada (a) y método Pechini (b).

Tabla 3. Sensibilidad y tiempo de estabilización a la exposición de O₂ y CO, a 250° y 350°C, de películas gruesas del sistema SnO₂- óxido de bismuto obtenidas por el método Pechini.

% en moles de Sb	Gas	R _t / R _i a 250°C	Tiempo (s)	R _t / R _i a 350°C	Tiempo (s)
0.5	O ₂	12	3447	32	2916
	CO	4	160	3	12
1	O ₂	5	3850	80	5370
	CO	3	242	6	18
3	O ₂	ND	-----	6.4	4710
	CO	1.4	267	4.2	8

ND: son valores que no se determinaron por tener un tiempo de estabilización superior a los 1000 s.

evitar la aglomeración de las partículas. Con relación al sentido de CO se tienen tiempos de respuesta más altos, si se comparan con los obtenidos para el sentido de O₂, y baja sensibilidad independiente del método de síntesis empleado para obtener los polvos cerámicos utilizados para el conformado de las películas. Estos resultados indican que el óxido de bismuto estaría favoreciendo el transporte de oxígeno hacia la superficie de la película. Por otro lado, los resultados obtenidos con la presencia de CO concuerdan con los que reporta la literatura (Savala G. et al. 1999) quienes indicaron que las películas únicamente registraron un aumento en la sensibilidad y selectividad de CO a temperaturas cercanas a 800°C, debido a la formación de Bi₂Sn₂O₇. Esta fase no fue registrada en el presente trabajo y ello puede ser una causa de la baja sensibilidad de la película ante la presencia de CO.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden extraer del trabajo realizado son:

1. Las curvas de TG muestran una ganancia de peso debido al cambio del estado de oxidación que presenta el bismuto pasando del Bi₂O₃ (Bi³⁺) a Bi₂O₄ (Bi⁴⁺).

2. Las principales fases cristalinas presentes en las muestras correspondientes al sistema Sn-Bi, tratadas a 600°C, fueron el SnO₂ (PDF-411445) y Bi₂O₄ (PDF-830410), independiente del método de síntesis. Por otro lado el compuesto Sn₃O(OH)₂SO₄ es la fase que predomina en las muestras sin tratamiento térmico.

3. Las fotografías obtenidas con microscopía electrónica mostraron la presencia de aglomerados de partículas que influyeron en el comportamiento como sensor de gas de los sistemas estudiados.

4. Los compuestos de SnO₂ – óxido de bismuto estudiados fueron sensibles más a la presencia de O₂ que de CO en la atmósfera circundante. Es necesario optimizar las condiciones de obtención de estos sensores de gas con el fin de disminuir su tiempo de respuesta y aumentar su sensibilidad, principalmente a la presencia de CO.

5. La baja velocidad de respuesta de los sistemas estudiados se debe en gran parte a la presencia de aglomerados en las muestras, independientemente del método de síntesis, por lo que es necesario eliminarlos de las muestras. Un estudio más cuidadoso sobre la naturaleza de la superficie de las partículas utilizadas para conformar las películas sensoras de SnO₂ – óxido de bismuto es importante; para ello se puede utilizar XPS.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los proyectos COL-CIENCIAS con código 1103-14-17900 y PROALERTA VIII.13 de la Red CyTED de Materiales Electrocerámicos, por la ayuda económica brindada a la Srta. Alejandra Montenegro para realizar su pasantía en la División Cerámicos del Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales-INTEMA / Mar del Plata-Argentina.

6. Bibliografía

- Adamian Z.N., Abovian H.H.V., Aroutionian V.M. 1996. Smoke sensor on the base of Bi₂O₃ sesquioxide. *Sens. Actuat*; **35-36**: 241-243.
- Aroutionian V.M., Adamian Z.N., Abovian H.V., Movsessian K.R., Barsegyan A.A., Panossian M.S. 1995. Method of Making Smoke Detector. US Patent; **5**: 382-341.
- Barsan N, Udo W. 2001. Conduction model of metal oxide gas sensors. *J. Electroceram*; **7**: 143-167.
- Bernardi M.I.B., Soledade L.E. 2002. Influence of the concentrations of Sb₂O₃ and the viscosity of the precursor solution and the electrical and optical properties of SnO₂ thin films produced by the Pechini method. *Thin solid Films*; **405**: 228-233.
- Delgado R. 2001. Sensores de gases basados en óxidos de estaño: una aproximación electroquímica. Tesis doctoral Universidad de Barcelona.
- Devi G.S., Manorama S.V., Rao V.J. 1999. SnO₂:Bi₂O₃ based CO sensor: Laser-Raman, temperature programmed desorption and X-ray photoelectron spectroscopic studies. *Sens. Actuat*; **56**: 98-105.
- Giuntini J. C., Granier W, Zanchetta J. V, Taha A. 1999. Sol-gel preparation and transport properties of a tin oxide. *J. Mat. Sci. Lett*; **9**: 1383-1388.
- Huamán F, Reyes L. 2001. Detección de vapor de etanol por modificación de la conductividad eléctrica del dióxido de estaño.

- TECNIA, Vol 8 N°01, Universidad Nacional de Ingeniería Lima – Perú.
- Jarzebski J. M., Marton J. P.** 1976. Physical properties of SnO₂ materials-II. Electrical properties. *J. Electrochem. Soc*; **129**: 299C-310C.
- Lanciotti F., Pizani P. S., Soares P. C.** 2002. Synthesis of SnO₂ nanoribbons by a carbothermal reduction process. *J. Nanosci. Nanotechnol*; **2**: 125-128.
- Leite E. R., Gomes J. W., Oliveira M. M., Lee E. J. H., Longo E., Varela J. A., Paskocimas C. A., Boschi T. M.**
- Liu F., Quan B., Chen L.** 2004. Investigation on SnO₂ nanopowders stored for different time and BaTiO₃ modification. *Mater. Chem. Phys*; **87**: 297-300.
- Liu F., Quan B., Liu Z., Chen L.** 2004. Investigation on SnO₂ nanopowders stored for different time and BaTiO₃ modification. *Mat. Chem. Phys*; **93**: 301-304.
- Liu F., Quan B., Liu Z., Chen L.** 2005. Surface Characterization study on SnO₂ powder modified by thiourea. *Mater. Chem. Phys*; **93**: 301-304.
- Madau M.J., Morrison R.** 1989. Chemical sensing with solid state devices. academic Press, Inc., San Diego.
- Ponce M. A.** 2003. Preparación y evaluación de sensores de gases de SnO₂. Pretesis de Doctorado en Ciencia de Materiales, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Radecka M., Zakrzewska K., Rekas M.** 1998. SnO₂ – TiO₂ solid solutions for gas sensors. *Sens. Actuators*; **47**: 194-204.
- Savala G. D., Manorama S.V., Rao V.J.** 1999. SnO₂:Bi₂O₃ based CO sensor: Laser-Raman, temperatura programmed desorption and X-ray photoelectron spectroscopic studies. *Sens. Actuators*; **56**: 98-105.
- Sberveglieri G., Faglia G., Groppelli S., Nelli P.** 1992. Methods for the preparation of NO, NO₂, and H₂ sensors based on tin oxide thin films, grown by means of the r.f. magnetron sputtering technique. *Sens. Actuators*; **8**: 79-88.
- Schweizer-Berberich M., Zheng T.G., Weimar U., et al.** 1996. The effect of Pt and Pd surface doping on the response of nanocrystalline tin dioxide gas sensors to CO. *Sens. Actuators*; **31**: 71-75.
- Serrini P., Briois V.** 1997. Chemical composition and crystalline structure of SnO₂ thin films used as gas sensor. *Thin Solid Films*; **304**: 13-122.
- Sze S.M.** 1994. Semiconductors sensors. Nacional Chao Tung University, Ed. John Wiley.

Recibido: diciembre 7 de 2006

Aceptado para su publicación: julio 24 de 2007

FIRST RECORD OF *EUFRIESEA BARE* GONZÁLEZ & GAIANI AND NOTES ON THE DISTRIBUTION OF THREE SPECIES OF ORCHID BEES PERTAINING TO THE GENUS *EUGLOSSA* LATREILLE (APIDAE: EUGLOSSINI) IN COLOMBIA

Por

Alejandro Parra-H¹ & Guiomar Nates-Parra^{1,2}

Abstract

Parra-H., A. & G. Nates-Parra: First record of *Eufriesea bare* González & Gaiani and notes on the distribution of three species of orchid bees pertaining to the genus *Euglossa* Latreille (Apidae: Euglossini) in Colombia Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 415-423, 2007. ISSN 0370-3908.

Knowledge on the geographical distribution of orchid bee species in Colombia and most of the Neotropics depends on monitoring and sample methodologies implemented and facilities to access diverse natural regions. In addition, for research on distribution of species, the taxonomic impediment is a problem for the identification and confirmation of some species, although the tribe Euglossini presents a relatively well developed taxonomy. Herein is presented the first record of *Eufriesea bare* in Colombia, an orchid bee species known only the Venezuelan Amazonian region; as well as the distribution of three euglossine species of the genus *Euglossa*.

Key words: Amazon basin, Andes, Chocó region, Colombia, eastern llanos foothill, *Eufriesea bare*, *Euglossa*, Euglossini, first record, orchid bees, taxonomy.

Resumen

El conocimiento sobre la distribución geográfica de las especies de abejas de las orquídeas en Colombia y la mayor parte del neotrópico depende de las metodologías de monitoreo y muestreo que se implementen además de las facilidades de acceder a las diversas regiones naturales. Igualmente, para la investigación sobre la distribución de las especies, el impedimento taxonómico es un problema para la identificación y confirmación de algunas especies, a pesar que la tribu Euglossini presen-

1 Laboratorio de Investigaciones en Abejas LABUN, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. varnishpt@yahoo.com

2 mgnatesp@unal.edu.co

ta una taxonomía relativamente bien desarrollada. En este trabajo se presenta por primera vez en Colombia un registro de *Eufriesea bare*, una especie de abeja de las orquídeas conocida únicamente de la cuenca amazónica venezolana, a la vez que se presenta la distribución de tres especies de euglosinos del género *Euglossa*.

Palabras clave: Abejas de las orquídeas, Andes, cuenca amazónica, Chocó, Colombia, *Eufriesea bare*, *Euglossa*, Euglossini, piedemonte llanero, primer registro, taxonomía.

Introduction

Orchid bees (Apidae: Euglossini) commonly occur in wet forests in the Neotropical Region (Pearson & Dressler, 1985) although a few species happen in xeric like open habitats (Roubik, 2004; Roubik & Hanson, 2004). The tribe has a frequent distribution from the sea level up to 1700 meters of elevation, while few species are found above higher altitudes as transients (Dick *et al.* 2004; Nates-Parra *et al.*, 2006). The tribe Euglossini subsists among vast natural areas (Roubik & Hanson, 2004), even though some species can survive in less conserved areas since their social structure gives them plasticity for the exploitation of resources (Parra-H *et al.*, 2005; Parra-H & Nates-Parra, 2007). In addition, it is also known that orchid bees prefer certain resources and in consequence unfold complex foraging behaviors (Ackerman *et al.*, 1982; Kato *et al.*, 1992).

The particular topography in Colombia, given by the three Andean mountain chains, has had a strong influence in the biology and biogeography of Euglossine species, limiting and conditioning the actual distribution array of the tribe (Dick *et al.*, 2004). In Colombia, orchid bees distribute through all natural regions (Bonilla-Gomez & Nates-Parra, 1992; Ramirez *et al.*, 2002) and some species occur in a characteristic cross Andean array (Dick *et al.*, 2004). Some authors asseverate that the reason for this arrangement responds in part to the thermal regulation capabilities of some large species (Inouye, 1975), the extraordinary Euglossine performances and wide flight ranges (Kroodsmas, 1975; Dudley, 1995).

Geographical and biological studies among orchid bees distribution, implicate a well taxonomic resolution, which in the tribe is partially well developed (Ospina-Torres *et al.*, 2006), albeit sampling design and previous knowledge of particular study areas, would provide specific results on species diversity (Nemesio & Silveira, 2004). Taxonomic impediment could be resolved by means of genital morphology, which in addition to external morphology, seems to be of great value in the trustworthy taxonomic identifications, especially for species of the genus *Euglossa* Latreille (Ospina-Torres *et al.*, 2006).

For the genus *Eufriesea* Cockerell, no recent new species have been described (Cameron, 2004; Oliveira pers. com). *Eufriesea bare* González & Gaiani was described in the Venezuelan Amazon basin (González & Gaiani, 1989; Ramírez *et al.*, 2002). It seems there, have been poorly sample efforts which consider that the genus *Eufriesea* resemble seasonal variations because their pupal diapause (Kimsey, 1982) which makes difficult monitoring its' species.

Euglossa hemichlora Cockerell has been reported for Colombia in the Chocó region and Amazon basin. *Euglossa ioprosopa* Dressler, as well as *Euglossa mourei* Dressler, are only known in Colombia in the Amazon basin (Ramírez *et al.*, 2002).

Herein we report for the first time a male of *Eufriesea bare* collected in the forest canopy of the Colombian Amazon region. We also report new records of *Euglossa hemichlora* in the north of the eastern Colombian Andes and eastern llanos foothill: and *E. ioprosopa* and *E. mourei* in the Colombian Chocó region.

Materials and methods

Individuals of those orchid bee species (*Eufriesea bare*, *Euglossa hemichlora*, *E. ioprosopa* and *E. mourei*) from the bee collection of the Laboratorio de Investigaciones en Abejas (LABUN), Universidad Nacional de Colombia were examined (Appendix 1). A preliminary confirmation of the individual's identification was conducted following the taxonomic key proposed by Bonilla-Gómez & Nates-Parra (1992). Afterward, the genital capsule was extracted and compared with the original description (*Eufriesea bare*) and reference material (*Euglossa* spp.). For the specimens of *Euglossa*, the gonostilus was removed and prepared following Ospina-Torres *et al.* (2006) for comparison with gonostilus from the reference material deposited at the LABUN. Images were generated using a digital camera.

Results

External and genital morphology is perfectly congruent with, as original descriptions for the *Eufriesea bare* male (Figs. 1, 2) as the reference material for the individuals of *Euglossa* (Fig 3).

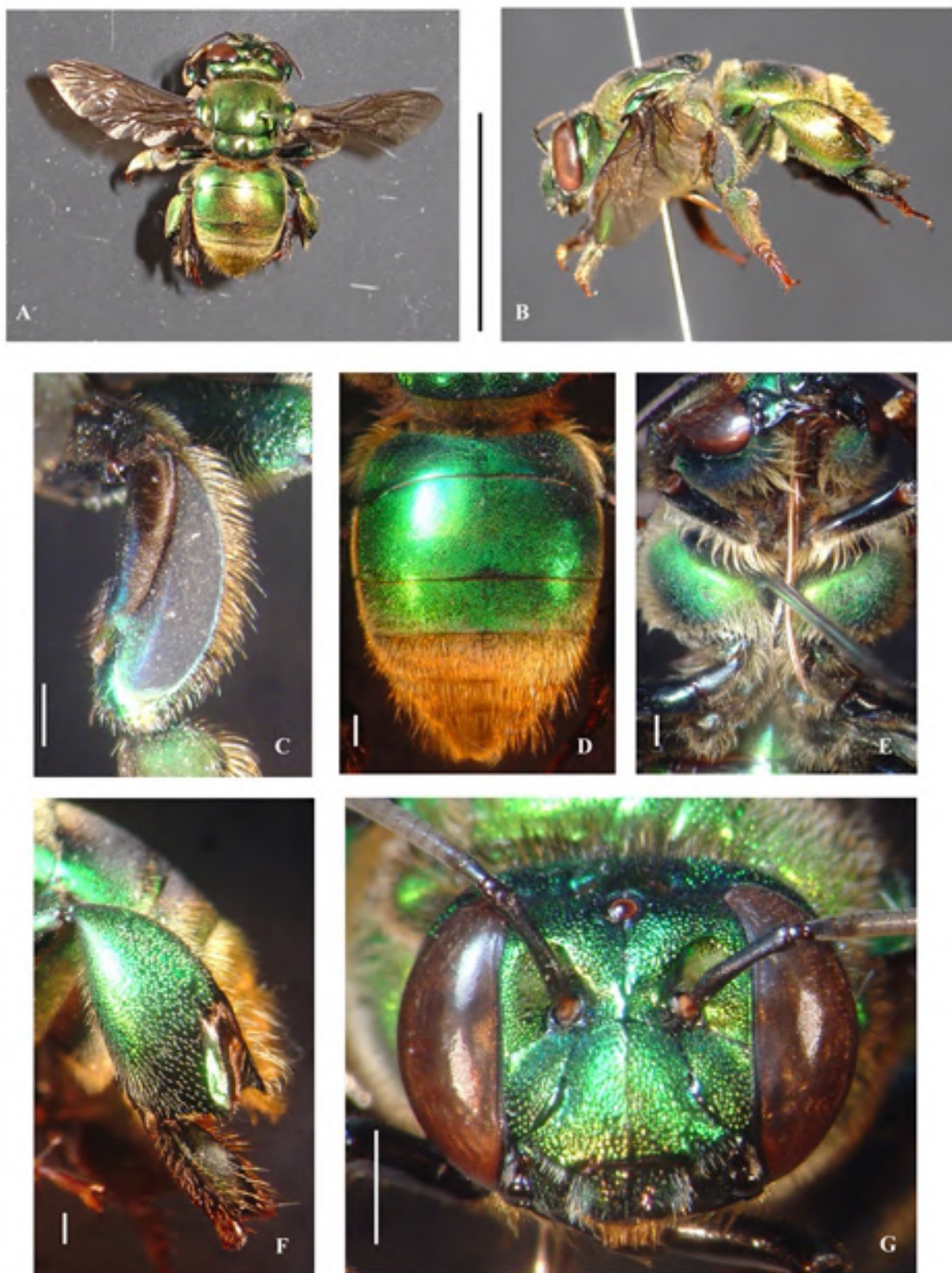


Figure 1. *Eufriesea bare* male (LABUN 17976). A, body dorsal view; B, body lateral view (scale 10 mm.); C, mid tibial velvety area; D, abdomen dorsal view; E, thorax ventral view; F, hind tibia and G, head frontal view (scale 0.83 mm.).

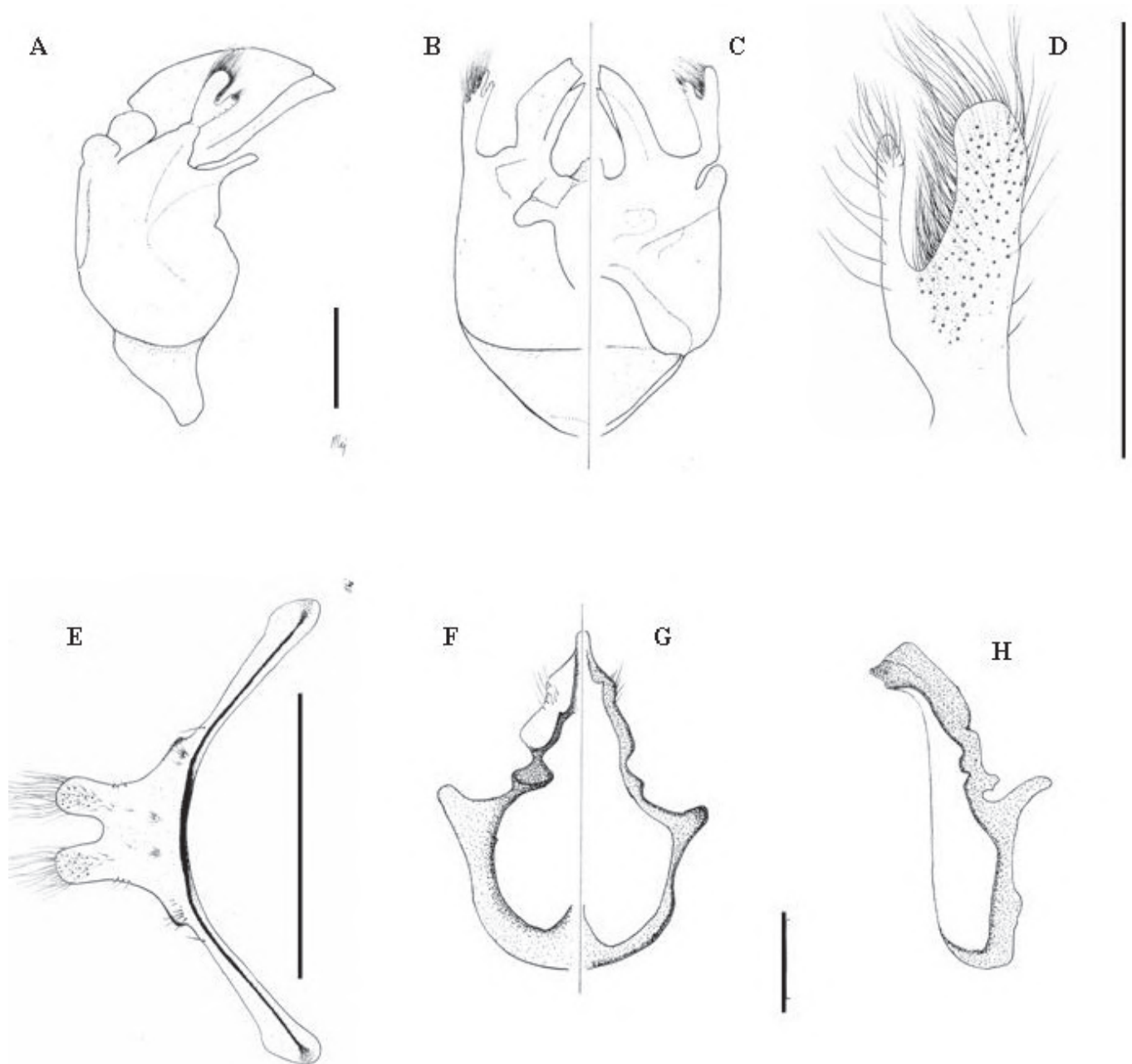


Figure 2. Male genitalia of *Eufriesea bare* (LABUN 17976). A, Genital capsule lateral view; B, dorsal view and C, ventral view; D, gonostilus; E, sternite VII; F, subgenital plaque dorsal view; G, ventral view and H, lateral view (Scale 0.83 mm.).



Figure 3. Head frontal view, mid tibial velvety area and gonostylus of: A, *Euglossa hemichlora* (LABUN 18119); B, *E. ioprosopa* (LABUN 18319) and *E. mourei* (LABUN 18539) (Scale 0.83 mm.).



Figure 4. Distribution in Colombia of *Eufriesea bare* (s), *Eglossa hemichlora* (*), *Eglossa ioprosopa* (o) and *Eglossa mourei* (◀).

A single male of *Eufriesea bare* is registered in the Amazon basin in the Tararira municipality (Vaupés, Colombia). New records of *Euglossa hemichlora* are registered in Floridablanca municipality (Santander, Colombia) and municipalities of Cumaral, Acacías and Villavicencio (Meta, Colombia). *E. ioprosopa* is registered in Bahía Solano municipality (Chocó, Colombia) and *E. mourei* is reported from Barbacoas municipality (Nariño, Colombia). An uncommon record of *E. ioprosopa* from Bogotá city (located 2560 meters above sea level) is reported, but it seems to be an accidental appearance explained by means of a possible nest that was transported in a wood shipment from a region where the species naturally occur (Parra-H & Nates-Parra, 2006). The additional records of *Euglossa* species correspond to the natural regions where this genus has been previously reported in Colombia (Fig. 4).

Discussion

Eufriesea bare is a distinct orchid bee species, very different in its coloration and pilosity from the known species of the genus in Colombia. In addition, the Venezuelan Amazon region, from *E. bare* was described (González & Gaiani, 1989) corresponds to the same physiographic unit (*sensu* Rangel-Ch & Aguilar-P, 1995) where we are reporting it for Colombia.

The knowledge of orchid bees in Colombia do not necessarily corresponds to a representative sample of the total natural regions where they occur, but we consider that, by means of the biological and ecological aspects of the Tribe, it is possible to infer or predict its probable distribution. Indeed, it is required to implement studies on biology while inventories are developed. Attest of this, are the records presented in this work and the recent descriptions of new euglossine species from regions of difficult access or which have been poorly sampled (*e.g.* Ramírez, 2006; Parra-H *et al.*, 2006).

On the other hand, the records of the species of *Euglossa* registered for the biogeographic Chocó region, northeastern Andes and eastern llanos foothill, let us propose that the distribution *E. hemichlora*, *E. ioprosopa* and *E. mourei* throughout Colombia, could be that of a cross Andean species (*sensu* Dick *et al.*, 2004). If the Andean Chain Mountains arose early after Euglossine bee's appearance, the subsequent diverse physiological and biological adaptations would have limited them to the particular habitat where they actually occur. Additionally, social plasticity and the thermal capabilities favor some species to occupy diverse habitats across altitudinal gradients (Parra-H *et al.*, 2005).

Then, in the genus *Euglossa*, as it happens in large species, the specializations expressed in resource exploitation could not be fairly different to the other Euglossini genera, but subsequently, the social structure predominant among this genus could have segregated its' species to the niche amplitude that they actually display: mid to low elevation lands.

Acknowledgments

Authors are grateful to Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Also we specially thank Marcio Luiz de Oliveira, Evandson José dos Anjos Silva, Carlos Alberto Garófalo and David Roubik for their aid in the identification of the male of *Eufriesea* and Martha Lucia Bueno, Mariana Cadavid and Víctor H. González for review and provide useful comments on the manuscript.

Literature

- Ackerman, J.D., M.R. Mesler, K.L. Lu, & A.M. Montalvo. 1982. Food-foraging behavior of male Euglossini (Hymenoptera: Apidae): Vagabonds or trappliners? *Biotropica*. 14: 24-248.
- Bonilla-Gómez, M.A. & G. Nates-Parra. 1992. Abejas euglosinas de Colombia (Hymenoptera: Apidae) I. Claves ilustradas. *Caldasia*. 17: 149-172.
- Cameron, S.A. 2004. Phylogeny and biology of neotropical orchid bees (Euglossini). *Annu Rev Entomol*. 49: 377-404.
- González, J.M. & M.A. Gaiani. 1989. New species of *Eufriesea* (Hymenoptera: Apidae) from Venezuela. *J Trop Ecol*. 37: 149-152.
- Dick, C. W., D.W. Roubik, K.F. Gruber & E. Bermingham. 2004. Long-distance gene flow and cross-Andean dispersal of lowland rainforest bees (Apidae: Euglossini) revealed by comparative mitochondrial DNA phylogeography. *Mol Ecol*. 13: 3775-3785.
- Dudley, R. 1995. Extraordinary flight performance of orchid bees (Apidae: Euglossini) hovering in heliox (80%He/20% O₂). *J Exp Biol*. 198: 1065-1070.
- Inouye, D.W. 1975. Flight temperatures of male Euglossine bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini). *J Kansas Entomol Soc*. 48: 366-370.
- Kato, M., D.W. Roubik, & I. Inoue. 1992. Foraging behavior and concentration preferences of male Euglossine bees (Hymenoptera: Apidae). *Tropics*. 1: 259-264.
- Kimsey, L.S. 1982. Systematics of bees of the genus *Eufriesea* (Hymenoptera, Apidae). University of California Publications, Entomology. 95: 1-125.
- Kroodsmma, D.E. 1975. Flight Distances of Male Euglossine Bees in Orchid Pollination. *Biotropica*. 7: 71-72.
- Nates-Parra, G., A. Parra-H, A. Rodríguez, P. Baquero, & D. Vélez. 2006. Abejas silvestres (Hymenoptera: Apoidea) en ecosistemas urbanos: Estudio en la ciudad de Bogotá y sus alrededores. *Rev Col Entomol*. 32: 77-84.

- Nemésio, N. & F.A. Silveria.** 2004. Biogeographic notes on rare species of Euglossina (Hymenoptera: Apidae: Apini) occurring in the Brazilian Atlantic rain forest. *Neotrop Entomol.* 33: 117-120.
- Ospina-Torres, R., A. Parra-H, & V.H. González.** 2006. The male gonostylus of the orchid bee genus *Euglossa* (Apidae: Euglossini). *Zootaxa.* 1320: 49-55.
- Parra-H, A., G. Nates-Parra, & M. Cadavid.** (2005). Abejas de las Orquídeas en dos Ambientes con Distinta Perturbación en el Piedemonte Llanero. ¿Es la Estructura Social una Ventaja o un Límite de Supervivencia? *In: Chacón, P. & M. Chaves.* (Eds.). Libro de Resúmenes V Coloquio de Insectos Sociales IUSSI-Sección Bolivariana. Universidad del Valle. Facultad de Ciencias. Cali. Colombia. pp. 127.
- , G. Nates-Parra. (2007). Variación de la comunidad de abejas de las orquídeas (Hymenoptera: Apidae) en tres ambientes perturbados del piedemonte llanero colombiano. *Rev Biol Trop.* 55: 931-941.
- & **G. Nates-Parra.** (2006). First record of *Euglossa ioprosopa* Dressler 1982, in an urban environment in the high Andes of Colombia. *Anais do VII Encontro sobre Abelhas.* Ribeirão Preto, SP, Brasil. pp. 841.
- , **R. Ospina-Torres, & S. Ramírez.** 2006. *Euglossa natesi* n. sp., a new species of orchid bee from the Chocó region of Colombia and Ecuador (Hymenoptera: Apidae). *Zootaxa.* 1298: 29-36.
- Pearson, L.D. & R.L. Dressler.** 1985. Two-year study of male orchid bee (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) attraction to chemical baits in lowland south-eastern Perú. *J Trop Ecol.* 1: 37-54.
- Ramírez, S.** 2005. *Euglossa paisa*, a new species of orchid bee from the Colombian Andes (Hymenoptera: Apidae). *Zootaxa.* 1065: 51-60.
- , **R.L. Dressler & M. Ospina.** 2002. Orchid bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) from the Neotropical Region: A species checklist with notes on their biology. *Biot Col.* 3: 7-118.
- Rangel-Ch, J.O. & M. Aguilar-P.** 1995. Una aproximación sobre la diversidad climática en las regiones naturales de Colombia. *In: Rangel-Ch, J. O* (Ed.). Colombia Diversidad biótica I. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá pp. 25-76.
- Roubik, D.W. & P.E. Hanson.** 2004. Orchid bees of tropical America: Biology and field guide. INBIO, Heredia, Costa Rica, 370 pp.
- . 2004. Sibling species of *Glossura* and *Glossuropoda* in the Amazon region (Hymenoptera: Apidae: Euglossini). *J Kansas Entomol Soc.* 77: 235-253.

Recibido: marzo 21 de 2007

Aceptado para su publicación: septiembre 24 de 2007

Appendix 1

Examined material from Laboratorio de Investigaciones en Abejas LABUN, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Sorted by LABUN number.

Eufriesea bare González & Gaiani 1989.

MALE. **Colombia**. Vaupés. Taraira. Caparú biology station. Collected by L. Benavides in a canopy Malaise. 10/12/02. 200 m. LABUN 17976.

Euglossa hemichlora Cockerell 1917.

MALE. **Panamá**. Cerro Jefe. Collected by R. L. Dressler. 17/07/69. LABUN 1731; FEMALE. **Ecuador**. Pichincha. Santo Domingo. Collected by R. L. Dressler. 22/07/67. LABUN 1732; MALE. **Colombia**. Valle del Cauca. Cali. Collected by B. Losada. 1/04/45. LABUN 5783; MALE. **Colombia**. Meta. Villavicencio. E.B.T.R.F. 590 m. 22/03/93. LABUN 14220, 14222; MALE. **Ecuador**. Pichincha. Santo Domingo. Collected by R. L. Dressler. 28/07/67. LABUN 15044; MALE. **Panamá**. Barro Colorado. Collected by Silberglied–Aiello, Bencil benzoate. 1/07/78. LABUN 15045; MALE. **Panamá**. Barro Colorado. Collected by R. L. Dressler in *Notylia panamensis*. 18/06/68. REF LABUN 15046; MALE. **Colombia**. Chocó. Bahía Solano. Huaca. Finca. Collected by R. Ospina-Torres, Metil Salicilate. 22/07/93. LABUN 16471; MALE **Colombia**. Meta. Cumaral. San Nicolás. Collected by A. Parra-H, Cineole. 16/11/03. LABUN 16679; MALE. **Colombia**. Meta. Villavicencio. Collected by J. Hernández Cineole. 560 m. 8/04/01. LABUN 16714; MALE. **Colombia**. Caquetá. Paujil. Vereda Puente Albania. Collected by V. H. González. 450 m. 2/04/96. LABUN 17042, 17043, 17044; FEMALE. **Colombia**. Santander. Floridanblanca. Casiano. Finca Las Brisas. Collected by G. Nates-Parra & A. Parra-H, in trap nest. 1160 m. 2/10/04. LABUN 18071, 18109, 18110, 18111, 18112, 18114, 18118; MALE. **Colombia**. Meta. Acacías. Vereda San José.

Collected by A. Parra-H, Cineole, forest fragment. 600 m. 5/10/04. LABUN 18082; MALE. **Colombia**. Santander. Floridanblanca. Casiano. Finca Las Brisas. Collected by A. Parra-H, in trap nest. 1160 m. 3/10/04. LABUN 18108, 18113, 18119.

Euglossa ioprosopa Dressler 1982.

MALE. **Colombia**. Amazonas. Araracuara. Margeniza. Rio Caquetá. Collected by M. Torres, wet forest. 100 m. 1/12/88. LABUN 5471; MALE. **Colombia**. Amazonas. Leticia. Collected by R. L. Dressler Vainillin. 80 m. 9/06/74. REF LABUN 6044 Paratype; MALE. **Peru**. Huanuco. Llulla pichis. Río Pchitea. Collected by R. L. Dressler, Skatole. 6/02/75. REF LABUN 6045; MALE. **Colombia**. Chocó. Bahía Solano. Playita. Collected by G. Gerlach, 2 n metilamin benzaldehyde. 40 m. 1/09/94. LABUN 16328, 16419; MALE. **Colombia**. Caquetá. Paujil. Vereda Puente Albania. Collected by V. H. González. 450 m. 31/03/96 LABUN 17048; MALE. **Colombia**. Amazonas. Leticia. Imani. Collected by C. Quijano, Cienole. 80 m. 24/10/02. LABUN 17071; MALE. **Colombia**. Cundinamarca. Bogotá. Quiroga. Collected by N. Ballona, in *Impatiens balsamina*. 2650 m. 1/10/05. LABUN 18319.

Euglossa mourei Dressler 1982.

MALE. **Colombia**. Amazonas. Leticia. Collected by R. L. Dressler, Vainillin. Paratype. 80 m. 6/06/74. REF LABUN 6063; MALE. **Colombia**. Caquetá. Valparaiso. Collected by H. Robinson, Cineole. 7/11/68. REF LABUN 6064; MALE. **Colombia**. Nariño. Barbacoas. Corregimiento Altaquer. La Tajada. Collected by V. Solarte, Vainillin. PAÑ 183. 960 m. 7/05/05. LABUN 18539.

NUEVOS REGISTROS DE CRUSTÁCEOS, DECÁPODOS DE AGUA DULCE, (TRICHODACTYLIDAE, PSEUDOTHELPHUSIDAE, ATYIDAE, PALAEMONIDAE), EN LA REGIÓN DE ACANDÍ

Por

Diana R. Triana¹ & Martha R. Campos^{2,3}

Resumen

Triana, D. R. & M. R. Campos: Nuevos Registros de Crustáceos, Decápodos de Agua Dulce (Trichodactylidae, Pseudothelphusidae, Atyidae, Palaemonidae) en la Región de Acandí, Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31 (120): 425-434, 2007. ISSN 0370-3908.

Se presentan los resultados del estudio de crustáceos, decápodos de agua dulce, en la región de Acandí. El material biológico colectado pertenece a los Infraórdenes Caridea y Brachyura, representados por las especies *Macrobrachium acanthurus* (Wiegmann, 1836), *M. carcinus* (Linnée, 1758), *M. crenulatum* (Holthuis, 1950), *Potimirim glabra* (Kingsley, 1978), *Sylviocarcinus piriformis* (Pretzmann, 1968) y *Potamocarcinus pinzoni* (Campos, 2003). Los nuevos registros, incluidos en el presente trabajo, amplían la distribución de las especies. El área de estudio se caracteriza por ser una de las regiones ecológicas más importantes del país, por su ubicación y estado de conservación. Sin embargo, la presión ejercida por la población creciente en la región pone en riesgo la estabilidad del ecosistema y las poblaciones.

Se propone la conservación del hábitat con el apoyo de entes particulares y el establecimiento de cultivos de especies nativas.

Palabras clave: Crustáceos, Decápodos, Trichodactylidae, Pseudothelphusidae, Atyidae, Palaemonidae, Chocó.

Abstract

The results of the study of fresh water Crustacean, decapod, in the region of Acandí, Sapzurro, are presented. The collected biological materials belong to the Infraorders Caridea and Brachyura, represented by the species *Macrobrachium acanthurus* (Wiegmann, 1836), *M. carcinus* (Linnée, 1758), *M. crenulatum* (Holthuis, 1950), *Potimirim glabra* (Kingsley, 1978), *Sylviocarcinus piriformis* (Pretzmann, 1968) and *Potamocarcinus pinzoni* (Campos, 2003). Herein included new records extend the species' distribution. The Acandí region is characterized for being one of the most important ecological regions of Colombia, specially for its location and conservation. Nevertheless, increased pressure of region's settlers represents a risk for the stability of the ecosystem and therefore of the species' populations. The conservation of this region should be supported by privated entities and stablishment of aquaculture systems with native species.

Key words: Crustacean, Decapod, Trichodactylidae, Pseudothelphusidae, Atyidae, Palaemonidae, Chocó.

¹ Zootecnista, Universidad Nacional de Colombia, Correo electrónico: drrodriguez@unal.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá. Correo electrónico: mhrochad@unal.edu.co

³ Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Bogotá.

1. Introducción

El Darién Colombiano es una zona fronteriza con Panamá, comprende la región de Urabá, Parque Nacional Natural los Katíos, cuenca baja del río Atrato y las cuencas altas de los ríos Salaquí y Juradó. Geográficamente la región está localizada entre 6° 36'y 8° 45'N, y 76° 13'y 77° 49'W, la cual es considerada un corredor para la dispersión de la biota entre Centro y Sur América, se caracteriza por un alto grado de endemismos y hace parte del Chocó Biogeográfico, una de las ecorregiones más biodiversas que se conocen (Rangel, 2004). Con base en la clasificación de Olson & Dinerstein (2002) de las ecorregiones terrestres, ésta zona se encuentra dentro del bioma de las Selvas Húmedas Tropicales y Subtropicales y se mantiene en un alto grado de conservación, lo cual lo ubica dentro del 20 % de áreas consideradas estratégicas a nivel mundial. Una característica particular de ésta área es la riqueza hídrica, en la cual es posible encontrar asociados, diferentes grupos de organismos, dentro de los que se destacan los crustáceos, decápodos. Los crustáceos de agua dulce desde el punto de vista ecológico son bioindicadores de aguas no contaminadas, además son elemento esencial en la cadena trófica de los sistemas acuáticos. En muchas regiones de Colombia estos crustáceos son fuente de alimento. A pesar de su importancia los registros de crustáceos, decápodos para esta región son fragmentarios. El objetivo de este trabajo es realizar un inventario y efectuar un análisis ecológico de la fauna de crustáceos, decápodos para la región del Darién, específicamente para los corregimientos de Sapzurro y San Francisco. Igualmente es una contribución al conocimiento de la diversidad, distribución y estado de las poblaciones, especialmente en zonas estratégicas. Adicionalmente establecer la relación que existe con la comunidad y el manejo que ésta hace de los recursos naturales, mediante encuestas a la población sobre la utilización de éste recurso. Esta información permitirá tomar medidas que contribuyan a su manejo y conservación.

2. Materiales y métodos

Se efectuó una salida de campo durante los meses de diciembre y enero de 2005, con el fin de establecer la composición de crustáceos decápodos de las fuentes hídricas de los corregimientos de Sapzurro y San Francisco, municipio de Acaandí, Departamento del Chocó. Las colecciones se realizaron de forma manual o con redes, mediante exploraciones diurnas y nocturnas. Los organismos fueron preservados en alcohol 70° y rotulados para su posterior determinación taxonómica en el laboratorio de Crustáceos del Instituto de

Ciencias Naturales. En el laboratorio, los especímenes fueron determinados taxonómicamente con base en las siguientes claves taxonómicas: Campos (2005), Holthuis (1952), Magalhães & Türkay (1996), Rodríguez (1982, 1992), Williams (1984). Para los camarones pertenecientes a la familia Palaemonidae Rafinesque, 1815, se utilizaron las claves taxonómicas de Holthuis (1952), las cuales esencialmente se basan en la morfología del rostro y del segundo par de pereopodos de los machos adultos. Esto dificultó la determinación de machos juveniles y hembras. Para los especímenes se registraron las medidas: TL, longitud total, medida desde el extremo distal del rostro hasta el extremo del telson y CL, longitud del caparazón, medida desde la parte posterior del rostro hasta el borde del caparazón. Para las familias de cangrejos Pseudothelphusidae Rathbun, 1893 y Trichodactylidae H. Milne Edwards, 1853, las medidas cl y cb, corresponden a la longitud y al ancho del caparazón, respectivamente. Una vez determinado taxonómicamente el material, se elaboraron las diagnósticos para las especies y se establecieron las variaciones morfológicas de las diferentes poblaciones. Igualmente se elaboró un mapa (Fig. 3) de distribución de las especies representadas en esta región de Colombia. Esta información permitirá diseñar e implementar estrategias de conservación, lo cual es prioritario debido al alto grado de deforestación, especialmente en bosques de galería que constituye el hábitat preferencial de los organismos acuáticos. Además desarrollar planes de manejo de estos recursos e implementar opciones de cultivo de algunas de las especies.

3. Resultados

Se colectaron 79 especímenes del Orden Decapoda, 11 pertenecientes al Infraorden Brachyura y 68 al Infraorden Caridea.

Infraorden Brachyura

Familia Trichodactylidae H. Milne Edwards, 1853

Sylviocarcinus piriformis (Pretzmann, 1968)

Diagnosis. Caparazón subcircular, margen lateral anguloso con espinas semi-agudas, frente sin espinas o tuberculos; somitas abdominales III a V fusionados y el VI libre. Primer gonopodo del macho amplio basalmente disminuyendo su amplitud distalmente, ápice angosto, superficie caudal con un lóbulo accesorio basal, lado mesial convexo, lado lateral recto en su porción apical con una depresión en su parte media y un lóbulo redondeado basalmente, contorno del ápice ovalado con abertura caudal, largas setas sobre el

borde lateral, 3 diferentes parches de espinas las cuales se extienden proximalmente sobre las superficies caudal, lateral y cefalo-mesial. Segundo gonópodo del macho considerablemente más largo que el primero y curvado en forma de signo de interrogación mesialmente.

Material examinado. Chocó, Acandí, Corregimiento San Francisco, Vereda Coquitral, quebrada Coquitral, 9 enero 2006, 1 macho cl 37.0 mm, cb 41.3 mm, 1 hembra cl 35.8 mm, cb 39.6 mm, ICN-MHN-CR 2295.

Variaciones. De acuerdo a la descripción de Campos (2005) no se observaron variaciones en el material examinado.

Distribución. Con base en Campos (2005) *Sylviocarcinus piriformis* se distribuye en la cuenca alta y media del río Magdalena y la cuenca del Lago de Maracaibo. Este registro contribuye a la ampliación de la distribución de la especie a la cuenca de la quebrada Coquitral en el Departamento del Chocó (Fig. 3).

Familia Pseudothelphusidae Rathbun, 1893

Potamocarcinus pinzoni Campos, 2003

Fig.1A- D

Diagnosis. Caparazón con surco medio recto y profundo, lóbulos postfrontales prominentes, mero del tercer maxilípedo con el margen externo recurvado y una profunda depresión subdistal, exognato 0.5 veces la longitud del isquio del endognato. El lóbulo caudal del primer gonopodo del macho con su porción distal transversal al eje del gonopodo, lóbulo mesial parcialmente doblado sobre el campo de espinas; proceso mesial prominente, triangular, agudo; ápice elongado meso-lateralmente; hileras de setas conspicuas en el margen proximalmente y en la porción subdistal del lado mesial.

Material examinado. Chocó, Acandí, Corregimiento Sapzurro, quebrada La Piedrecita, 32 m alt., 8° 39' 54.5" N, 77° 22' 29.7" W, 14 diciembre 2005, 2 machos, lc 45.8 y 57.6 mm, cb 69.2 y 89.9 mm, ICN-MHN-CR 2270.- Corregimiento Sapzurro, quebrada El Salto, 9 m alt., 8° 39' 24.2" N, 77° 22' 0.76" W, 20 diciembre 2005, 6 enero 2006, 2 hembras, lc 26.5 y 66.6 mm, cb 39.6 y 103.6 mm, ICN-MHN-CR 2273, 2285.- Corregimiento San Francisco, Vereda Sardí, quebrada Sardí, 7 y 10 enero 2006, 2 machos, cl 47.3 y 53.9 mm, cb 72.4 y 85.6 mm, 1 hembra, cl 57.9 mm, cb 90.4 mm,

ICN-MHN-CR 2288, 2299.- Corregimiento San Francisco, Vereda Coquitral, quebrada Coquitral, 9 enero 2006, 1 macho, lc 40.7 mm, cb 63.1 mm, 1 hembra, lc 52.8 mm, cb 82.2 mm, ICN-MHN-CR 2296.

Variaciones. En los especímenes examinados se encontraron las siguientes variaciones respecto a la descripción del holotipo, a nivel del caparazón: el surco cervical puede o no alcanzar el márgen anterolateral; el número de tubérculos entre la depresión del ángulo orbital externo y el surco medio varía de 1 a 3, mientras que en el holotipo el número de tubérculos es de 4; en el margen lateral el número de espinas oscila entre 4 y 9, mientras que en el holotipo es de 17; los lóbulos postfrontales varían de redondeados, similares al holotipo, hasta ovalados en algunos especímenes examinados; el borde superior de la frente, en vista dorsal y frontal, desde casi recto, como en el holotipo, hasta ligeramente convexo; el borde orbital inferior presenta de 13 a 26 tuberculos, los cuales disminuyen de tamaño hacia el borde lateral; la proporción de la longitud del exognato con respecto al isquio del endognato varía entre 0.4 y 0.6, comparado con el holotipo que es 0.51. En el primer gonopodo también se observaron variaciones con respecto a la descripción e ilustraciones del holotipo. El lóbulo caudal presenta la porción distal recta, mientras que en el holotipo es transversal al eje del gonopodo (ICN-MHN-CR 2285); el proceso mesial varía de agudo a romo (Fig. 1 A-C), con predominio de la forma aguda, similar a la del holotipo (Campos, 2003, Fig. 1A); el borde distal del proceso puede ser sinuoso y se curva caudo-cefálicamente, esta curvatura es directamente proporcional al tamaño del proceso (ICN-MHN-CR 2288); el lóbulo cefálico varía con respecto al holotipo (Campos, 2003, Fig. 1B), en lo relativo a la forma, amplitud y longitud (Fig. 1A-C); el proceso medio cefálico presenta el ápice desde agudo hasta romo, con el borde distal sinuoso (Fig. 1A-C), mientras que en el holotipo el ápice es agudo y con una protuberancia subapical en el borde distal (Campos, 2003, Fig. 1B, D); el proceso proximo-lateral es similar al holotipo (Fig. 1A), mientras que en otros especímenes es semiagudo o agudo y de menor tamaño (Fig. 1B, C).

Distribución. Para la especie *Potamocarcinus pinzoni*, sólo se registra la localidad típica: Río Grande, municipio de Apartadó, Departamento de Antioquia (Campos, 2003). El presente trabajo contribuye a ampliar su distribución desde el Golfo de Urabá hasta los límites con Panamá (Fig. 3).

Infraorden Caridea

Familia Palaemonidae Rafinesque 1815

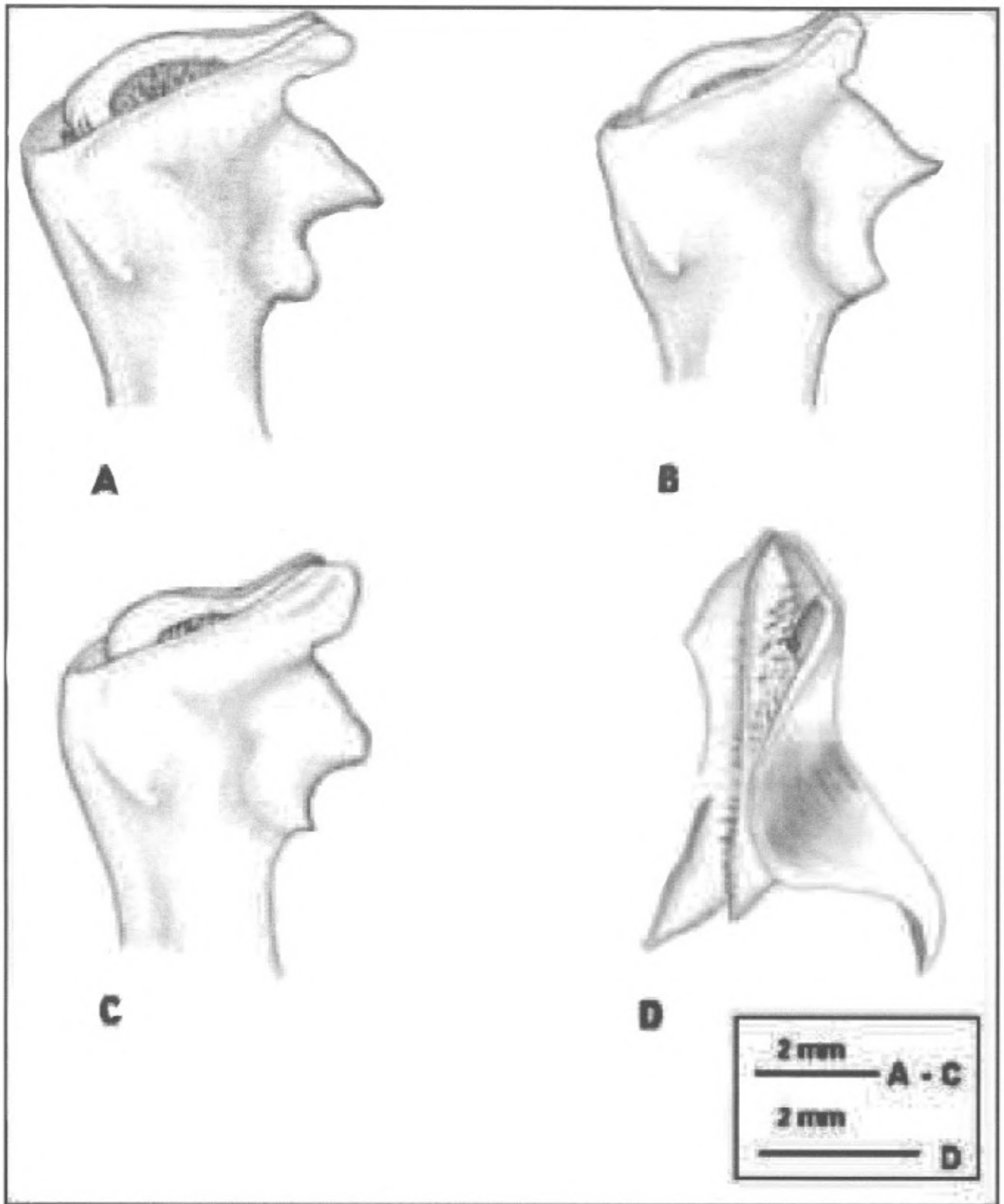


Figura 1: *Potamocarcinus pinzoni* Campos, 2003: gonopodo izquierdo A-C, vista cefálica, ICN-MHN-CR 2288, 2299, 2285; D, ápice en vista distal, ICN-MHN-CR 2288.

***Macrobrachium acanthurus* (Wiegmann, 1836)**

Fig. 2 A

Diagnosis. Rostro sinuoso, sobrepasa el escafo-cerito, margen superior con 8 a 10 espinas, margen inferior con 5 a 6 espinas (Fig.2 A). El segundo par de pereopodos similares en forma y tamaño, el mero más corto que la palma y el carpo, el carpo cerca de 5 veces más largo que ancho, dedos ligeramente más largos que la palma y densamente pubescentes.

Material examinado. Chocó, Acandí, Corregimiento Sapzurro, en caño cerca de la playa, 4 m alt., 8° 39' 57.9" N, 77° 22' 14.1" W, 4 y 5 enero 2006, 2 machos, TL 63.2 y 55.1 mm, CL 16.9 y 15.3 mm, 9 hembras, 5 ovígeras, la de mayor tamaño TL 63.4 mm, CL 17.8 mm, la de menor tamaño TL 46.4 mm, CL 12.7 mm, ICN-MHN-CR 2281, 2283.- Corregimiento San Francisco, Vereda Sardí, quebrada Sardí, 8 y 10 enero 2006, 2 machos, TL 77.2 y 76.3 mm, CL 18.1 y 19.3 mm, ICN-MHN-CR 2290, 2297.

Variaciones: En algunos especímenes se observó que el carpo del segundo par de pereopodos igualaba el escafo-cerito, usualmente, este segmento sobrepasa el escafo-cerito. Por carecer del segundo par de pereopodos, la mayoría de los especímenes examinados, no fue posible determinar otras variaciones. Se examinaron 5 hembras ovígeras, lo cual permite concluir que enero, corresponde a un período de reproducción.

Distribución. *Macrobrachium acanthurus* ha sido registrada para cuerpos de agua dulce cercanos a la costa, desde Carolina del Norte, Estados Unidos, hasta Río Grande do Sul, Brasil (Holthuis, 1952, Magalhães *et al.*, 2003). Valencia & Campos (2007), registran ésta especie para los Departamentos de Atlántico, Bolívar, Magdalena y Sucre. El presente trabajo contribuye a la ampliación de la distribución de la especie al Departamento del Chocó (Fig.3).

***Macrobrachium carcinus* (Linnée, 1758)**

Fig.2B

Diagnosis. Rostro lanceolado, sobrepasa el escafo-cerito y se extiende más allá del pedúnculo antenular, margen superior con 11 a 15 espinas, margen inferior con 3 a 4 espinas (Fig.2 B). El segundo par de pereopodos similares en forma y tamaño, cubiertos de espinas, mero más corto que la palma, pero más largo que el carpo, dedos ligeramente más largos

que la palma y con escasa pubescencia.

Material Examinado. Chocó, Acandí, Corregimiento Sapzurro, quebrada La Piedrecita, 32 m alt., 8° 39' 54.5" N, 77° 22' 29.7" W, 14 diciembre 2005, 2 machos, TL 101.4 y 45.4 mm CL 32.4 y 13.3 mm, 2 hembras, TL 52.1 y 32.5 mm, CL 15.7 y 17.6 mm, ICN-MHN-CR 2269.- Corregimiento Sapzurro, quebrada El Salto, 9 m alt., 8° 39' 24.2" N, 77° 22' 0.76" W, 20 y 21 diciembre 2005, 6 enero 2006, 7 machos, el de mayor tamaño TL 158.5 mm, CL 54.0 mm, el de menor tamaño, TL 58.2 mm, LC 17.2 mm, 9 hembras, la de mayor tamaño, TL 98.1 mm, CL 30.2 mm, la de menor tamaño, TL 53.1 mm, CL 15.2 mm, ICN-MHN-CR 2271, 2274, 2284.- Corregimiento Sapzurro, quebrada Próspero, 16 m alt., 8° 39' 39.5" N, 77° 21' 52.6" W, 21 diciembre 2005, 2 machos, TL 48.5 y 42.7 mm, CL 14.4, 13.6 mm, 3 hembras, una con rostro fracturado, LT 48.5 y 42.7 mm, CL 14.4, 13.6 y 15.2 mm, ICN-MHN-CR 2275.- Corregimiento Capurganá, quebrada La Carolina, 5 m alt., 8° 38' 49.9" N, 77° 21' 53.2" W, 22 diciembre 2005, 1 macho, TL 119.8 mm, CL 38.2 mm, 1 hembra, TL 90.8 mm, CL 20.8 mm, ICN-MHN-CR 2278.- Corregimiento San Francisco, Vereda Sardí, quebrada Sardí, 7-10 enero 2006, 3 machos, LT 93.5, 79.2 y 58.3 mm y LC 29.8, 25.0 y 17.1 mm, 1 hembra, TL 87.2 mm, CL 27.3 mm ICN-MHN-CR 2286, 2291, 2297.

Variaciones. En el material examinado se encontraron algunas variaciones con respecto a la diagnosis de (Valencia & Campos, 2007) el mero del segundo par de pereopodos es mayor que el carpo y cerca de la mitad de la palma en la mayoría de especímenes, solo en dos ejemplares alcanzó 0.75 (ICN-MHN-CR 2269, 2286); la palma es ligeramente más corta que los dedos. Tres machos, ICN-MHN-CR 2294, con medidas: TL 60.0, 54.1 y 52.3 mm CL 17.1, 16.0 y 15.2 mm, se determinaron como *Macrobrachium cf. carcinus*, debido a que los rangos de variaciones observadas, a nivel del segundo par de pereopodos, no coinciden con los rangos de la diagnosis de *M. carcinus* (Valencia & Campos, 2007).

Distribución. *Macrobrachium carcinus* ha sido registrada en cuerpos de agua dulce cercanos a la costa, desde Florida, Estados Unidos, hasta Río Grande do Sul en Brasil (Holthuis, 1952, Magalhães *et al.*, 2003). Valencia & Campos (2007) registran ésta especie para los Departamentos de Atlántico, Bolívar Córdoba, Guajira, Magdalena, Sucre y la Isla de Providencia. Los registros que se presentan en este trabajo contribuyen a la ampliación de la distribución de la especie al Departamento del Chocó (Fig. 3).

***Macrobrachium crenulatum* Holthuis, 1950**

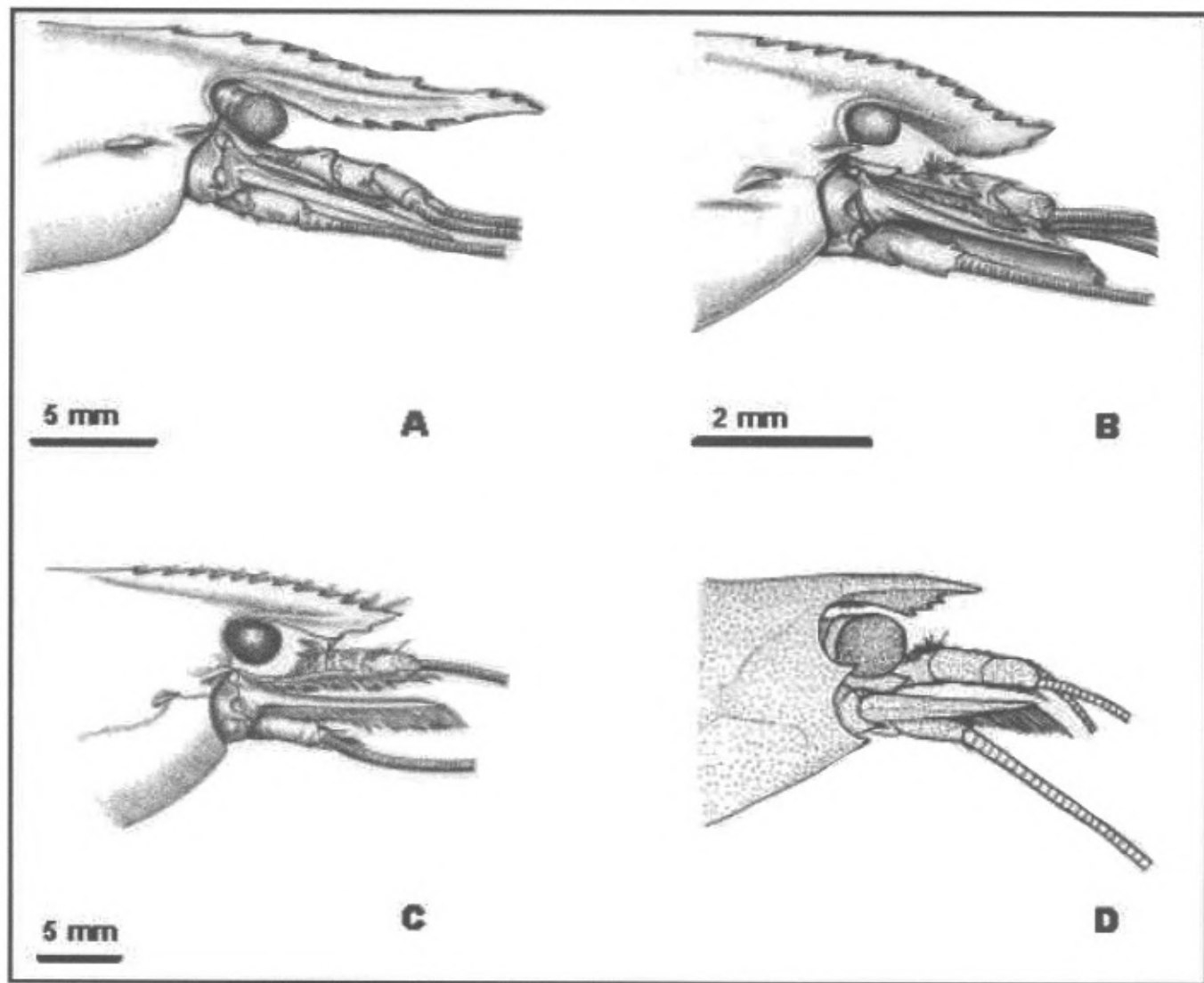


Figura 2: Parte anterior del cuerpo, vista lateral: A, *Macrobrachium acanthurus* (Wiegmann, 1836) ICN-MHN-CR 2283; B, *M. carcinus* (Linnée, 1758) ICN-MHN-CR 2284; C, *M. crenulatum* Holthuis, 1950 ICN-MHN-CR 2272; D, *Potimirim glabra* Kingsley, 1978, modificado de Magalhães *et al.*, 2003.

Fig. 2C

Diagnosis. Rostro recto, tan largo como el pedúnculo antenular, margen superior con 11 a 13 espinas, margen inferior con 3 a 4 espinas (Fig. 2 C). Segundo par de pereopodos diferentes en forma y tamaño, cubiertos de espinas muy conspicuas, el mero más largo que el carpo, superficie externa de la palma de la quela mayor densamente pubescente, palma más larga que alta, dedos más largos que la palma y con amplio receso entre ellos.

Material examinado. Chocó, Acandí, Corregimiento Sapzurro, quebrada El Salto, 9 m alt., 8° 39' 24.2" N, 77° 22' 0.76" W, 20 diciembre 2005, 2 machos TL 70.3 y 56.0 mm, CL 23.2 y 17.1 mm, ICN-MHN-CR 2272.- Corregimiento Sapzurro, quebrada Próspero, 16 m alt., 8° 39' 39.5" N, 77° 21' 52.6" W, 20 diciembre 2005, 2 machos, TL 56.2 y 53.5 mm, CL 18.3 y 16.6 mm, ICN-MHN-CR 2276.- Corregimiento Capurganá, quebrada La Carolina, 5 m alt., 8° 38' 49.9" N, 77° 21' 53.2" W, 22 diciembre 2005, 1 macho, TL 45.8 mm, CL 14.2 mm, ICN-MHN-CR 2279.- Corregimiento Sapzurro, caño cerca de la playa, 4 m alt., 8° 39' 57.9" N, 77° 22' 14.1" W, 4 enero 2006, 1 macho, TL 50.2 mm, CL 15.7 mm, ICN-MHN-CR 2280.- Corregimiento San Francisco, Vereda Sardí quebrada Sardí, 7 enero 2006, 2 machos, TL 49.0 y 48.1 mm, CL 15.2 y 15.3 mm, 1 hembra, ovígera TL 59.0 mm, CL 20.2 mm, ICN-MHN-CR 2287, 2289.- Corregimiento San Francisco, quebrada Río Ciego, 9 enero 2006, 3 machos, TL 56.3, 55.0 y 53.2 mm, CL 19.0, 18.1 y 17.3 mm, 1 hembra, TL 42.0 mm, CL 13.2 mm, ICN-MHN-CR 2292.

Variaciones. En los especímenes examinados el número de espinas del margen superior del rostro oscila entre 11 y 13 y las del margen inferior entre 3 y 4. Se observaron también variaciones en cuanto a que el pereopodo mayor del segundo par alcanza con 1/3 porción del mero el extremo distal del escafocerito (ICN-MHN-CR 2287, 2292), en otros casos con 1/3 parte del carpo, o con su extremo distal (ICN-MHN-CR 2292, 2280); la longitud del mero puede ser igual, 3/4 o cerca de la 1/2 de la palma; la relación entre la longitud del isquio y el mero del pereopodo mayor, varía entre 1.7 y 3.2, con un valor promedio 2.2. Este valor es similar al registrado por **Valencia & Campos** (2007), mientras que **Holthuis** (1952), señala que la longitud del isquio equivale sólo a la mitad del mero; los dedos en la mayoría de los especímenes examinados son más largos que la palma.

Distribución. *Macrobrachium crenulatum* se distribuye en cuerpos de agua dulce cercanos a la costa Caribe desde Panamá hasta Venezuela incluyendo las Indias Occidentales

(**Holthuis**, 1952, **Magalhães et al.**, 2003). **Valencia & Campos** (2007) registran ésta especie para los Departamentos de Bolívar y Magdalena. El presente trabajo contribuye a la ampliación de la distribución de la especie al Departamento del Chocó (Fig. 3).

Familia Atyidae de Hann, 1849

Potimirim glabra Kingsley, 1978

Fig. 2 D

Diagnosis. Rostro con el margen superior convexo, con una longitud que alcanza la porción distal del primero o la mitad del segundo segmento del pedúnculo antenular, margen inferior con 2 a 3 espinas (Fig. 2 D). Carpo del segundo par de pereopodos más largo que ancho y la porción anterior usualmente no excavadas, quelas delgadas con largos mechones en los extremos de los dedos (**Rodríguez**, 1980).

Material examinado. Chocó, Acandí, Corregimiento Sapzurro, quebrada La Piedrecita, 32 m alt., 8° 39' 54.5" N, 77° 22' 29.7" W, 14 diciembre 2005, 3 hembras, ovígeras, la mayor con LT 20.3 mm y LC 52.2 mm, la menor con LT 19.1 mm y LC 50.0 mm, ICN-MHN-CR 2268.

Variaciones. No se observaron variaciones morfológicas de los especímenes examinados de acuerdo a la descripción de **Rodríguez** (1980).

Distribución. *Potimirim glabra* ha sido registrada en aguas continentales del Caribe desde las Antillas, América Central hasta Brasil. También hay registros de la vertiente Pacífica para El Salvador, Nicaragua, Costa Rica y Ecuador (**Rodríguez**, 1980, **Magalhães et al.**, 2003). Este trabajo contribuye a la ampliación de la distribución de la especie al Departamento del Chocó, en los límites con Panamá (Fig. 3).

4. Discusión y Conclusiones

Las especies de crustáceos, decápodos, registrados en el presente trabajo corresponden a nuevos registros para la región del Darién. La ampliación del rango de distribución de las especies confirma la importancia de esta región ecológica como punto estratégico de biodiversidad. Un ejemplo es *Potamocarcinus pinzoni*, de la cual sólo se conocía la localidad típica: Apartadó, Antioquia. Los registros incluidos en el presente estudio permiten establecer que los corregimientos Sapzurro y San Francisco son parte importante del área de

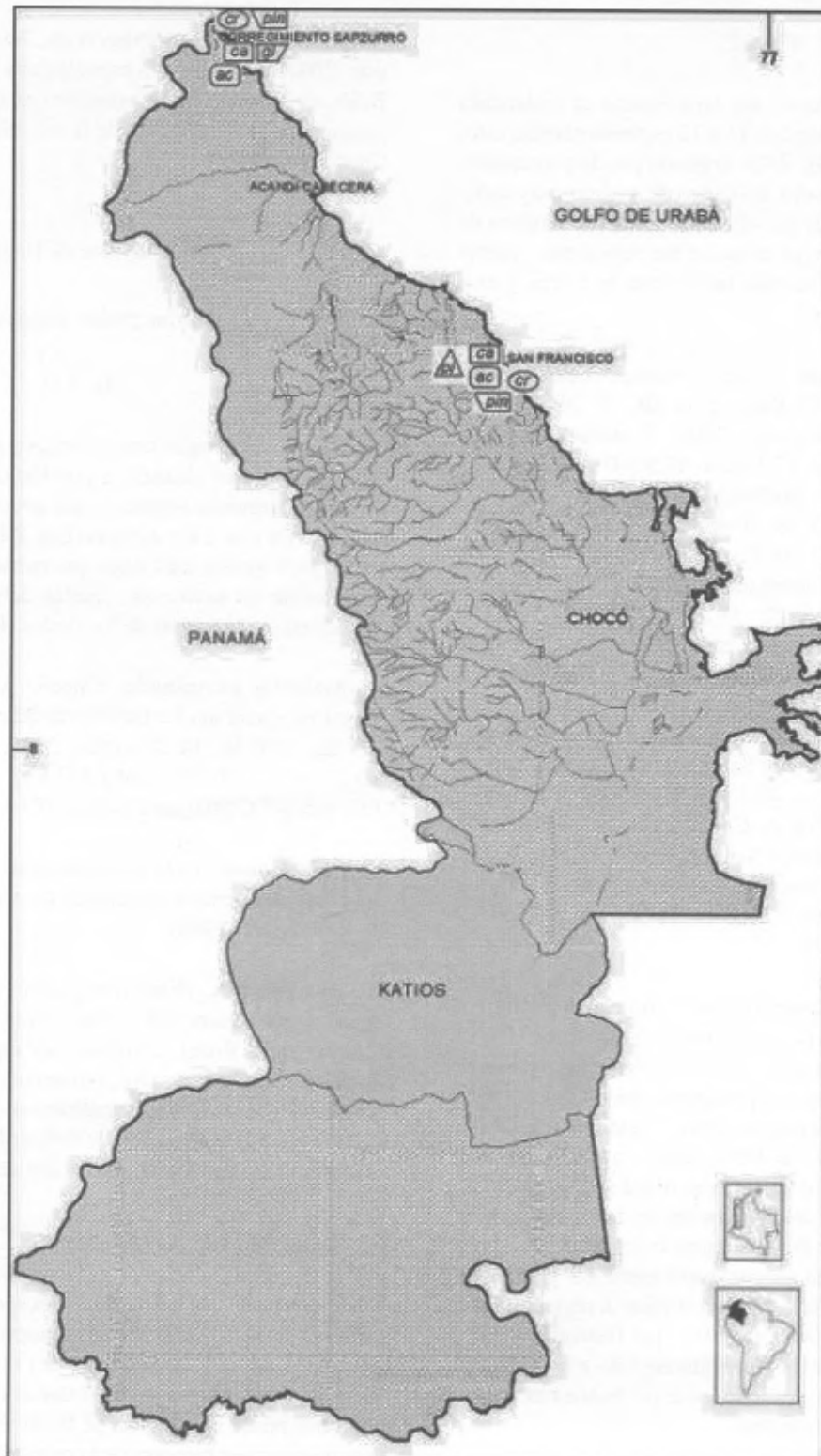


Figura 3: Distribución de Crustáceos, Decápodos: **ac**, *Macrobrachium acanthurus* (Wiegmann, 1836); **ca**, *M. carcinus* (Linnée, 1758); **cr**, *M. crenulatum* Holthuis, 1950; **gl**, *Potimirim glabra* Kingsley, 1978; **pi**, *Sylviocarcinus piriformis* (Pretzmann, 1968); **pin**: *Potamocarcinus pinzoni* Campos, 2003. Modificado del Mapa de Reservas Naturales de la Sociedad Civil.

distribución de esta especie. Es importante anotar que la presencia de crustáceos, decápodos, en las fuentes de agua dulce de ésta región, permiten considerarlas como aguas de buena calidad. Sin embargo, la constante presión sobre el ecosistema pone en riesgo su permanencia en ellas. Las encuestas realizadas a la población residente revelan que el consumo en el corregimiento de Sapzurro es exclusivamente de *Macrobrachium carcinus*, mientras que en el corregimiento de San Francisco, también consumen *M. acanthurus*. Su consumo se incrementa en los meses de diciembre a abril debido a que esta época es verano en la región y la disminución del caudal de las quebradas facilita su captura. Además, este lapso coincide con la afluencia de turistas a la región. Este hecho resulta bastante crítico para las poblaciones, en especial de *M. acanthurus*, ya que esta época coincide con su ciclo de reproducción. Por lo general, *M. crenulatum* no se captura, sin embargo algunos pescadores del corregimiento de San Francisco lo utilizan como carnada. Además de la presión ejercida por la población, las fuentes de agua dulce de esta región se usan para los acueductos de Sapzurro y San Francisco. En San Francisco se presenta el agravante de destrucción del ecosistema por la ampliación de potreros empleados para la explotación de ganado vacuno, lo cual conlleva a la pérdida de los bosques de galería, que son esenciales para la conservación de las fuentes de agua. Con relación a los cangrejos de agua dulce, la encuesta revela que no hace parte de la dieta de la población. Se considera que *Macrobrachium carcinus* es una especie con potencial para la zootecnia (Moreno *et al.*, 2000). Investigaciones recientes proponen también la producción de esta especie para repoblamiento, debido a su vulnerabilidad actual por la sobreexplotación (www.clicrbs.com.br/agrol). Las anteriores consideraciones ameritan plantear como alternativa de conservación la implementación de cultivos artesanales, lo cual podría disminuir la presión sobre las poblaciones naturales. Es de resaltar que algunas de las fuentes de agua dulce, donde se realizaron los muestreos, atraviesan propiedades privadas agrupadas bajo la organización Red Nacional de Reservas de la Sociedad Civil (RNRSC), específicamente, “Tatarcunas”, Corregimiento de Sapzurro, “La Coquerita” y “No te Aflijas”, Corregimiento de San Francisco. Su función es velar por la conservación de los ecosistemas a través del uso y manejo sostenible de la diversidad. Se concluye que el conocimiento de los recursos es el primer paso para la generación de alternativas viables en pro de la conservación y uso sostenible de los recursos naturales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Martha Rubio y Fabio Jiménez de la Reserva Natural Tatarcunas y a Tomás Díaz de la Reserva

Natural No te Aflijas por la valiosa colaboración durante el desarrollo de la fase de campo. Las ilustraciones de la figura 1 las elaboró el biólogo Luis Carlos Peña.

Referencias

- Campos, M. R.** 2003. A New species of freshwater crab of the genus *Potamocarcinus* H. Milne Edwards, 1853 (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae), from Colombia. *Academia Colombia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 117: 363-367.
- Campos, M. R.** 2005. Freshwater Crabs from Colombia a Taxonomic and Distributional Study. *Academia Colombia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, Colección Jorge Alvarez Lleras No. 24: 1-346.
- Hann, W.** 1833-1850. Crustacea. En P. F. von Siebold. *Fauna Japonica Sive Descriptio animalium, quae in Itinere per Japoniam, jussu et auspiciis superiorum, qui summum in India Batava Imperium tenent, suscepto, annis 1824-1830 collegit, notis, observationibus et adumbrationibus illustravit*. Fasc. 1-8, I-XX+VII-XVII+X-XVI+1-243, pls.1-55, A.Q., circ., pl 2. *Lugduni-Batavorum* (Leiden).
- Holthuis, L. B.** 1950. Preliminary descriptions of twelve new species of Palaemonid Prawns from American Waters (Crustacea, Decapoda). *Proceedings Koninklijke Nederland Akademie van Wetenschappen* 53:93-99.
- Holthuis, L. B.** 1952. A general Revision of the Palaemonidae (Crustacea: Decapoda: Natantia) of the American Subfamily Palaemoninae. *Occasional Papers. Allan Hancock Foundation Publications* 12: 1-396.
- Kingsley, J. S.** 1878. Note on North American Caridea in the Museum of the Peabody Academy of Science at Salem, Mass. *Proceedings of the Academy of Natural Science of Philadelphia* 30: 89-98.
- Linné, C.** 1758. *Systema Naturae per Regna Tria Naturae, Secundum Classes, Ordines, Genera, Species, cum Characteribus, Differentiis, Synonymis Locis*. Edition 10.1: 1-824.
- Magalhães, C. & M. Türkay.** 1996. Taxonomy of the Neotropical Freshwater crab family Trichodactylidae III. The Genera *Forsteria*, *Melocarcinus*, *Sylviocarcinus* and *Zilchiopsis* (Crustacea: Decapoda: Brachyura). *Senckenbergiana biologica, Frankfurt* 75:97-130.
- Magalhães, C., G. Bond-Buckup, G. Augusto, & L. Buckup.** 2003. *Manual de Identificação dos Crustacea Decapoda de Água Doce do Brasil*, Ediciones Loyola, São Paulo, Brasil 1-430.
- Milne Edwards, H.** 1853. *Mémoire sur la Famille des Ocypodiens*. *Annales des Sciences Naturelle, Zoologie* 20:163-228.
- Moreno, C., C. Graziani & T. Orta.** 2000. Reproducción Natural y Artificial del Camarón de Río *Macrobrachium carcinus* (L.). *Interciencia* 25:249-253.
- Olson, D. M. & E. Dinerstein.** 2002. The Global 200: Priority Ecoregions for Global Conservation. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 89:199-224.
- Pretzmann, G.** 1968. Die Familie Trichodactylidae (Milne Edwards, 1853) Smith. (Vorläufige Mitteilung) *Entomologisches Nachrichtenblatt, Wien* 15: 70-76.
- Rafinesque, C. S.** 1815. *Analyse de la Nature ou Tableau de l'univers et des Corps Organisés*. Palermo. L'Imprimerie de Jean

Barravecchia. 1-224.

Rangel, O. 2004. Colombia Diversidad Biótica IV, El Chocó Biogeográfico/ Costa Pacífica, Editor, J. Orlando Rangel-Ch., Bogotá, Instituto de Ciencias Naturales 1:22.

Rathbun, M. J. 1893. Descriptions of New Species of American Freshwater Crabs. Proceedings of the United States National Museum 16: 649-611.

Rodríguez, G. 1980. Los Crustáceos Decápodos de Venezuela. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas 1-494.

Rodríguez, G. 1982. Decadopa. Les crabes d' eau douce d' Amérique. Famille des Pseudothelphusidae. Faune Tropicale 22: 1-223.

Rodríguez, G. 1992. The freshwater crabs of America. Family Trichodactylidae and suplement to the family Pseudothelphusidae. Faune Tropicale 31: 1-189.

Valencia, D. M. & M. R. Campos. 2007. Freshwater prawns of the genus *Macrobrachium* Bate, 1868 (Crustacea: Decapoda: Palaemonidae) of Colombia. Zootaxa 1456:1-46.

Wiegmann, A. F. 1836. Beschreibung einiger neuen Crustaceen des Berliner Museums aus Mexico und Brasilien. Archive für Naturgeschichte 2:145-151.

Williams, A. B. 1984. Shrimps, Lobster and Crabs of the Atlantic Coast of the Eastern United States. Maine to Florida. Smithsonian Institute Press 1-550.

Recibido el 27 de junio de 2007.

Aceptado para su publicación el 17 de agosto de 2007.

PRIMER REGISTRO DEL GÉNERO *MICROTITYUS* KJELLESVIG-WAERING, 1966 (SCORPIONES: BUTHIDAE) EN COLOMBIA

Por

Ricardo Botero-Trujillo¹⁽⁺⁾ & Jorge Ari Noriega A.^{1(*)}

Resumen

Botero-Trujillo R. & J. A. Noriega A.: Primer registro del género *Microtityus* Kjellesvig-Waering, 1966 (scorpiones: Buthidae) en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31**(120): 435-436, 2007. ISSN 0370-3908.

El género *Microtityus* Kjellesvig-Waering, 1966 es un grupo de escorpiones que presenta un origen continental suramericano. Sus representantes actuales se conocen en gran parte de las islas del Caribe. En la porción continental suramericana este género se encuentra representado por un número menor de especies, distribuidas en Venezuela y Brasil. Recientes muestreos en la región Caribe de Colombia, permitieron detectar una población de *Microtityus*. Este nuevo hallazgo permite predecir que esta no es la única especie de *Microtityus* en Colombia, ya que muchas localidades en la región Caribe se encuentran sub muestreadas.

Palabras clave: *Microtityus*, Buthidae, Colombia, Región Caribe, Registro.

Abstract

The genus *Microtityus* Kjellesvig-Waering, 1966 is a group of scorpions of South American continental origin. Actual representatives are known mostly from Caribbean islands. In continental South America this genus is represented by a less number of species, distributed in Venezuela and Brazil. Recent collections in the Caribbean region of Colombia allowed detecting a population of *Microtityus*. With the new finding, it is to predict that this is not the only species of *Microtityus* in Colombia, since many Caribbean regions remain strongly under-sampled.

Key Words: *Microtityus*, Buthidae, Colombia, Caribbean region, Record.

¹ Laboratorio de Entomología, Unidad de Ecología y Sistemática- UNESIS, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana. Carrera 7a No. 40-62. Bogotá, Colombia. (+)pachyurus@yahoo.com, (*)jnorieg@hotmail.com.

El género *Microtityus* Kjellesvig-Waering 1966 es un grupo de escorpiones de origen Sur Americano (Santiago-Blay *et al.* 1990, Teruel *et al.* 2006) que incluye 25 especies y dos subespecies conocidas hasta la actualidad (una de ellas fósil) (Armas 1999, Fet & Lowe 2000, Teruel 2000, 2001, González-Sponga 2001, Teruel & Armas 2006, Teruel & Infante 2007).

La mayoría de los representantes de este género se encuentran presentes en las Islas del Caribe: Cuba, República Dominicana, Trinidad y Tobago e Islas Vírgenes (Francke & Sissom 1980, Armas 1999, Fet & Lowe 2000, Teruel 2000, 2001, Teruel & Armas 2006, Teruel & Infante 2007). A nivel continental este género solo se ha registrado en Venezuela y Brasil, sin tenerse información para países vecinos (Fet & Lowe 2000, González-Sponga 2001).

Durante la caracterización biológica de algunas localidades ubicadas en inmediaciones de la zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Tayrona, se logró registrar por primera vez la presencia de una población de *Microtityus* en territorio colombiano. La identidad específica de los ejemplares está en proceso de determinación.

Material colectado. COLOMBIA. **Magdalena:** 2 machos y 1 hembra, reserva privada Kalache Kalabria, Municipio de Santa Marta, zona de amortiguación P.N.N. Tayrona, (74° 4' 59.9" N - 11° 16' 21" W), 134 m, dic 2006, *J. Noriega, leg*, MPUJ.

Este nuevo registro eleva a cinco el número de géneros de Buthidae conocidos para Colombia: *Ananteris* Thorell, 1891; *Centruroides* Marx, 1890; *Microtityus*, *Rhopalurus* Thorell, 1876; y *Tityus* Koch, 1836.

Adicionalmente, es posible creer que una mayor riqueza de especies pueda presentarse en la porción continental que en la insular, concordando con la teoría de los centros de origen, pero es necesario tener un mayor número de registros y estudios en la parte continental. Finalmente, es necesario que se continúen realizando colectas en diferentes localidades en esta región, con el objetivo de establecer la distribución y diversidad de este género en el país.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Entomología de la Pontificia Universidad Javeriana. A Juan Manuel Renjifo y Camila Renjifo por su ayuda y apoyo en campo. A Juan Carlos Dib por toda su hospitalidad y amabilidad en el préstamo de las instalaciones durante el trabajo de campo. A Rolando Teruel (Cen-

tro Oriental de Ecosistemas y Biodiversidad BIOECO, Santiago de Cuba), Luis F. de Armas (La Habana, Cuba) y Oscar F. Francke (Universidad Nacional Autónoma de México) por la literatura facilitada.

Bibliografía

- Armas, L.F.** 1999. Quince nuevos alacranes de La Española y Navassa, Antillas Mayores (Arachnida: Scorpiones). *Avicennia*, 10-11: 109-144.
- Fet, V. & Lowe, G.** 2000. Family Buthidae. In: Fet, V, Sissom, W. D, Lowe, G. & Braunwalder M. E. (Eds.). *Catalog of the Scorpions of the World 1758-1998*. The New York Entomological Society, New York, pp. 54-286.
- Francke, O.F. & Sissom, W.D.** 1980. Scorpions from the Virgin Islands (Arachnida, Scorpiones). *Occasional Papers, The Museum, Texas Tech University*, 65: 1-19.
- González-Sponga, M.A.** 2001. Arácnidos de Venezuela. Seis nuevas especies del género *Microtityus* (Scorpionida: Buthidae) del sistema montañoso de la costa. *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, 61(1-2): 45-66.
- Santiago-Blay, J.A., Schawaller, W. & Poinar, G.O.** 1990. A new specimen of *Microtityus ambarensis* (Scorpiones, Buthidae), fossil from Hispaniola: evidence of taxonomic status and possible biogeographic implications. *The Journal of Arachnology*, 18: 115-117.
- Teruel, R.** 2000. Una nueva especie de *Microtityus* Kjellesvig-Waering, 1968 (Scorpiones: Buthidae) de Cuba Oriental. *Revista Ibérica de Aracnología*, 1: 31-35.
- . 2001. Taxonomía y distribución geográfica de *Microtityus fundorai* Armas, 1974 (Scorpiones: Buthidae) en la provincia Santiago de Cuba, Cuba. *Revista Ibérica de Aracnología*, 4: 29-33.
- & **Armas L.F.** 2006. Un nuevo *Microtityus* Kjellesvig-Waering, 1966 (Scorpiones: Buthidae) de Cuba Oriental. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 38: 113-116.
- & **Infante, L.M.** 2007. Un nuevo escorpión del género *Microtityus* Kjellesvig-Waering 1966 (Scorpiones: Buthidae) de la región oriental de Cuba. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 40: 227-231.
- , **Fet, V. & Graham, M. R.** 2006. The first mitochondrial DNA phylogeny of Cuban Buthidae (Scorpiones: Buthoidea). *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 39: 219-226.

Recibido: julio 22 de 2007

Aceptado para su publicación: septiembre 21 de 2007