

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXIII

MARZO DE 2009

NÚMERO 126

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO



## CONTENIDO - CONTENTS

|  | Pág. |   | Pág. |
|--|------|---|------|
| <b>Botánica</b> (Botany)   |      | <b>Química</b> (Chemistry)  |      |
| Estado del bosque seco tropical e importancia relativa de su flora leñosa, islas de la Vieja Providencia y Santa Catalina, Colombia, Caribe suroccidental.<br>[Condition and Relative importance of woody species of the Dry tropical Forest from the islands of Old Providence and Saint Catherine, Colombia, southwest Caribbean].<br><i>Jorge Ruiz Linares &amp; María Claudia Fandiño Orozco</i> ..... | 5    | Efecto de los parámetros de síntesis sobre las características del BaTiO <sub>3</sub> obtenido por coprecipitación<br>[Effects of synthesis parameters on the characteristics of BaTiO <sub>3</sub> obtained by coprecipitation]<br><i>Edison Rivera, Claudia Patricia Fernández-Perdomo &amp; Jorge Enrique Rodríguez-Páez</i> .....   | 93   |
| <b>Ciencias de la Tierra</b> (Earth Sciences)  |      | Aproximación <i>In silico</i> a la Estructura 3D de la Proteína Antiveneno DM64 de la Zarigüeya (Mammalia: Marsupialia: Didelphidae)<br>[In Silico Approximation to the 3D Structure of the Opossum's (Mammalia: Marsupialia: Didelphidae) Antivenom Protein DM64]<br><i>Juan-Fernando Duque-Osorio, Adalberto Sánchez, Leonardo Fierro &amp; Rafael Santiago Castaño</i> ..... | 103  |
| Nuevos aportes a la estimación del potencial de hidrocarburos en Colombia<br>[New contributions to the potential estimate of hydrocarbons in Colombia]<br><i>Carlos Alberto Vargas Jiménez</i> .....   | 17   | Filosofía de la Química: un área ampliamente olvidada<br>[Philosophy of Chemistry: a long neglected area]<br><i>Ricardo Vivas-Reyes</i> .....   | 125  |
| <b>Genética</b> (Genetic)  |      | <b>Zoología</b> (Zoology)   |      |
| Análisis dermatoglífico en poblaciones colombianas de Coyaima y Bogotá<br>[Dermatoglyphics in Coyaima and Bogotá populations of Colombia]<br><i>José V. Rodríguez Cuenca &amp; Dustano Luis Rojas Garcés</i> .....   | 45   | Asociaciones y patologías en los crustáceos dulceacuícolas, estuarinos y marinos de Colombia: aguas libres y controladas<br>[Associates and Pathologies in the Freshwaters, Estuarines and Marines Crustaceans of Colombia: Free and Controls Waters]<br><i>Ricardo Álvarez-León</i> .....  | 129  |
| <b>Historia y Filosofía de la Ciencia</b> (History and Philosophy of Science)  |      | <b>Constitución de la Academia</b>  |      |
| “Construction d’objet” et objectivité en physique quantique<br>[Object construction and objectivity in quantum physics]<br><i>Michel Paty</i> .....  | 61   | (Members of the Academy) .....  | 145  |
| <b>Matemáticas</b> (Mathematics)   |      | <b>Publicaciones de la Academia</b>   |      |
| Comportamiento en el infinito de las soluciones de una clase abstracta de ecuaciones de evolución<br>[Behaviour at infinity of solutions of an abstract class of evolution equations]<br><i>Gilberto Arenas Díaz, Henry Lamos Díaz &amp; Elder Jesús Villamizar Roa</i> .....  | 79   | (Publications of the Academy) .....   | 147  |

# ESTADO DEL BOSQUE SECO TROPICAL E IMPORTANCIA RELATIVA DE SU FLORA LEÑOSA, ISLAS DE LA VIEJA PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA, COLOMBIA, CARIBE SUROCCIDENTAL

Por

Jorge Ruiz Linares<sup>1</sup> & María Claudia Fandiño Orozco<sup>2</sup>

## Resumen

**Ruiz Linares, J. & M. C. Fandiño Orozco:** Estado del bosque seco tropical e importancia relativa de su flora leñosa, islas de la Vieja Providencia y Santa Catalina, Colombia, Caribe suroccidental. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(126): 5-15, 2009. ISSN 0370-3908.

El propósito del presente trabajo es presentar evidencia sobre la condición del Bosque Seco Tropical (BsT) en las islas de la Vieja Providencia y Santa Catalina. Se realizó un estudio cronológico del cambio de la cobertura del BsT entre 1944 y 2005. Adicionalmente, se levantaron sobre el bosque 109 cuadrantes de 2 x 50 m siguiendo el protocolo de **Gentry** (1982) y se realizó una aplicación de los modelos de abundancia de especies a los datos. Se concluye que desde el año 1944 el BsT ha presentado una tendencia a la recuperación hasta el 2000. No obstante, para el año 2005 se observó un retroceso a los niveles observados en 1990. Por su parte, la distribución log-normal de abundancia de especies sugiere que el bosque se encuentra efectivamente en buen estado. Anacardiaceae es la familia con el mayor Índice de Importancia Relativa y *Acacia collinsii* L. lo es a nivel de especies.

**Palabras clave:** Bosque seco tropical; Caribe; Colombia; índice del valor de importancia; Providencia.

<sup>1</sup> Profesor Asociado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Programa de Estudios de Posgrado en Geografía, Convenio UPTC-IGAC. Investigador Asociado, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Docente Categoría Doctor III, Universidad de La Salle, Bogotá, D. C. Correo electrónico: jorge.ruiz@uptc.edu.co

<sup>2</sup> Coordinadora Incentivos a la conservación para el manejo del territorio, Patrimonio Natural Fondo para la Biodiversidad y áreas protegidas, Bogotá, D. C. Colombia. Correo electrónico: mfandino@patrimoniounatural.org.co

### Abstract

The purpose of this paper is to present evidence on the condition of the Dry Tropical Forest (DtF) in Old Providence. A chronological study was carried out in order to assess the land cover change in DtF between 1944 and 2005. Additionally, we established 109 plots 2 x 50 m, following the protocol by **Gentry** (1982); and species abundance models were fitted to the data. It is concluded that up to 2000 the forest recovered, yet, in 2005 it retreated to 1990 levels. The lognormal distribution suggests that the forest is indeed in good condition. Anacardiaceae is the family with the highest Importance Value Index (IVI) while *Acacia collinsii* is the species with the highest IVI.

**Key words:** Caribbean; Colombia; Dry Tropical Forest; Importance Value Index; Old Providence.

### Introducción

Existen muchas definiciones de lo que constituye un bosque seco tropical (BsT) (**Mendoza**, 1999). No obstante, una de las principales características es el estrés hídrico que presentan por una pronunciada época seca con poca o ninguna precipitación (**Mooney et al.**, 1996); una precipitación inferior a los 2000 mm (**Cabrera et al.**, 2006); una elevación igual o inferior a 1000 m y una temperatura entre los 17 y 35°C (**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt**, 1998). Los bosques secos han recibido mucha menos atención científica y de gestión para su conservación en comparación a los bosques más húmedos (**Prance**, 2006). Cuando se hace referencia a la deforestación en América Latina y el Caribe, el análisis se centra generalmente en las zonas de bosques húmedos tropicales y subtropicales, olvidándose que las pérdidas pueden ser de igual o mayor magnitud en los BsT (**Winograd**, 1995). En efecto, muchos autores se refieren a este ecosistema, como uno de los más amenazados del neotrópico. Debido a la fertilidad de sus suelos, el BsT ha sido foco de desarrollo agrícola y objeto de una intensa transformación (**Chávez y Arango**, 1998; **Janzen**, 1988). **Miles y colaboradores** (2006) afirman que un 97% del BsT se encuentra en peligro de destrucción; y a pesar de sus altos niveles de endemismo y diversidad florística se encuentran mal protegidos (**Pennington et al.**, 2006). Las mayores aéreas de bosque seco tropical se encuentran al sur del Amazonas así como en las costas caribeñas de Colombia y Venezuela (**González-Carranza et al.**, 2008). **Prance** (2006) subraya que la vasta extensión de ese ecosistema frecuentemente no se ha contemplado en los esfuerzos de conservación. Colombia no es ajena a lo anterior y es claro lo mal representado que se encuentra este ecosistema en el portafolio de áreas protegidas (**Ruiz y Fandiño**, 2007; **Arango, et al.**, 2003; **IDEAM, SINCHI, iAvH, IIP, INVEMAR**, 2002), con relictos protegidos tan solo en dos parques

nacionales. El Tayrona en el departamento del Magdalena y el Old Providence & McBean Lagoon en Providencia. Según lo documentado a nivel de estudios subnacionales ecosistémicos en el Informe Nacional sobre el avance en el conocimiento y la información de la biodiversidad 1998-2004 (**Arango y Díaz**, 2006), se destaca de igual manera una baja representatividad de este ecosistema a nivel de las áreas protegidas referentes a categorías del orden nacional, regional y local (**IAvH**, 2002a, 2002b; **Armenteras et al.**, 2003; **Morales**, 2004).

Existe poca claridad frente a la extensión original del BsT en Colombia. Según **Etter** (1993), del área original de 80.000 km<sup>2</sup> de BsT o subhúmedos existentes en el país, sólo quedaba cerca del 1,5%. Empero, una reciente publicación (**IDEAM, IGAC, IAvH, Invemar, Sinchi, IIP**, 2007) calcula que el 13% de 76,581 km<sup>2</sup> del gran bioma del BsT corresponde a vegetación secundaria, excluyendo arbustales. Lo anterior estimaría la extensión actual del BsT en 9,955 km<sup>2</sup>, en franco reto a los estimativos tanto de **Etter** (1993) como de **Díaz** (2006), como se observa a continuación.

La distribución original del BsT en Colombia se encontraba en los valles interandinos de los ríos Magdalena y Cauca y en las regiones de la llanura Caribe (**Repizzo y Devia**, 2008). En estas últimas encontramos los bosques secos más extensos que cubren unos 1.355 km<sup>2</sup>; pero casi la mitad de estos se encuentran fuertemente intervenidos (**Díaz**, 2006). No obstante, la intervención no es reciente, toda vez que existe evidencia de esta desde la época precolombina (**Márquez**, 2004).

Por otro lado, algunos investigadores de este ecosistema, como por ejemplo **Gardner** (2006), así como **Silva y colaboradores** (2006), están postulando ante la comunidad científica tratar a las comunidades de sabanas tropicales y el bosque seco tropical como uno solo, en vista de su íntima relación y los mosaicos que estos forman. En el caso

colombiano, esto implicaría considerar a los llanos orientales como parte de este ecosistema. De hecho **Miles y colegas** (2006) consideran el piedemonte llanero colombiano como BsT. Lo anterior, hace aún menos claro, la extensión actual de este ecosistema tan amenazado.

En cuanto a las características de composición y estructura de los BsT de Colombia, se sabe que son similares a las observadas en otros bosques secos del neotrópico (**Gentry**, 1996; **Mendoza**, 1999). El estudio de los estados de crecimiento secundario es fundamental para el entendimiento de la dinámica de la pérdida del bosque y su recuperación (**Hartter et al.**, 2008).

**Gentry** y sus colegas (1982) desarrollaron una metodología estándar de muestreo rápido en BsT., la cual consiste en levantar diez cuadrantes de 2 x 50 m equivalentes a 0.1 ha., y censar toda la flora leñosa viva de más de 2.5 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP) en estructura y composición. No obstante, algunos autores han optado por modificar el protocolo de **Gentry** (1982) con el fin de incluir especies de 1 a 2.5 cm **Mendoza** (1999). Este hecho, se ha convertido en un obstáculo para la comparación entre distintos puntos de muestreo, lo que ha dificultado en gran medida la posibilidad de establecer los patrones de riqueza y la distribución de especies leñosas de este ecosistema.

El botánico **Gentry** visitó la isla en 1993, meses antes de su fallecimiento, y en sus notas de campo en puño y letra, que fueron publicadas por **González y colaboradores**

(1995), menciona que el bosque de Providencia se encuentra en buen estado, valiendo la pena su conservación. Con base en el análisis conjunto de tres de nuestros estudios sobre el BsT en estas islas, deseamos mostrar evidencia al respecto, en tanto que se presenta una aproximación de ecología del paisaje que contempla el muestreo de varias edades sucesionales del BsT de todas las Islas, presentando la más larga cronosecuencia y la mayor área muestreada de BsT con réplicas de 2 por 50 m en el neotrópico, de manera que lo reportado puede acercarse al nivel del área de parcelas permanentes en BsT.

### Descripción del área de estudio

Las islas colombianas de la Vieja Providencia y Santa Catalina se encuentran ubicadas en el caribe occidental, (13°21 N, 81°21 W), 230 km al este de Nicaragua y a 714 km, al noreste de Cartagena de Indias. El archipiélago registró entre 1973 y 2006 una temperatura promedio de 27.6°C y una precipitación media anual de 1.681 mm. Pareciera que durante los últimos 33 años la temperatura se ha incrementado ya que desde 1977 no se registra temperatura por debajo de 27°C. Al mismo tiempo, la precipitación parece haberse aumentado, ya que desde 1998 no se registra por debajo de 1,500 mm. El archipiélago presenta una época seca de enero a mayo, cuando la evaporación es superior a la precipitación, mientras que 90% de la precipitación ocurre de julio a diciembre (Figura 1). Lo anterior, según los datos provenientes de la estación meteorológica del Insti-

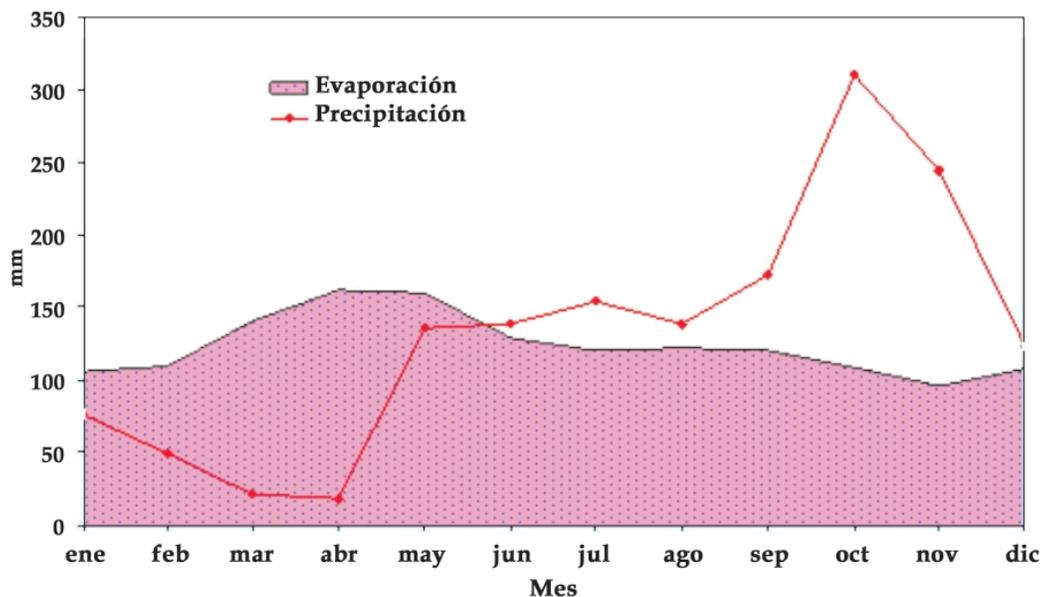


Figura 1. Evaporación y precipitación mensual en Providencia observada entre 1973 y 2006, estación meteorológica del IDEAM, Aeropuerto El Embrujo.

tuto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ubicada en el aeropuerto “El Embrujo” de Providencia.

Aproximadamente el 57% de la isla presenta una cobertura vegetal considerable (Ruiz *et al.*, 2005 a). La isla tiene relictos de manglar, bosques y fincas dedicadas a la ganadería, y en menor medida, a la agricultura. La topografía de estas islas, por su origen volcánico, es mayoritariamente escarpada. De otro lado, sus suelos son arcillosos, arenosos y franco arcillo arenoso y arcillo limosos, con un pH de 3.8- 6.2. En cuanto a la erosión, presentan una tendencia a muy erosionados y esqueléticos con cárcavas profundas y presenta una hidrología en crisis muy avanzada (Valdés *et al.*, 1997).

### Materiales y métodos

En la tabla 1 se presentan los estudios sobre el bosque seco tropical en las Islas de la vieja Providencia y Santa Catalina que son objeto del análisis llevado a cabo en el presente artículo, los cuales, se han enfocado en establecer el cambio de la cobertura boscosa, la riqueza, la composición y el estado del BsT a través de una cronosecuencia 1944-2005 y de la aplicación de modelos de abundancia de especies.

A continuación se presentan, de manera sucinta, los aspectos metodológicos referentes a la estimación de la cronosecuencia, el muestreo estratificado aleatorio simple, y la caracterización de la flora leñosa del BsT según protocolo de Gentry (1982). Mayores detalles sobre la metodología de los tres estudios está disponible en las publicaciones e informes de Ruiz y Fandiño (2007, 2006 a y b), y Ruiz y colaboradores (2005a y b).

### Estimación de la cronosecuencia 1944-2005

Con base en seis ventanas de ortofotografía pancromática de los años 1944, 1969, 1974, 1984, 1990 y 1996,

con escalas desde 1:6,500 a 1:22,500; así como tres juegos de imágenes satelitales de 1999, 2000 y 2005, LANDSAT 7 ETM+ para las dos primeras y QUICKBIRD para la última; se establece una cronosecuencia de las propiedades de al menos 45 por 70 m en las islas de la vieja Providencia y Santa Catalina, como unidad de análisis, que a junio del 2005 aparecieran con cobertura boscosa en la imagen QUICKBIRD. Para cada ventana de teledetección, esto es, fotografía aérea o imágenes de satélite, cada predio fue clasificado dicotómicamente con cobertura boscosa o no, si el predio tenía mayoritariamente una u otra categoría. Los polígonos de los predios se digitaron con base en los mapas catastrales de 1996 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Estos mapas análogos fueron escaneados y luego georeferenciados para luego digitar en el software ArcView 3.2 aquellos predios que cumplían con el criterio de inclusión anteriormente descrito. De esta forma se instaura la edad de los predios en el archipiélago. Esto es, de un lado, aquellos que jamás registraron actividad agrícola alguna y de otro, la edad desde su abandono de estas prácticas. A partir de la estimación de la cronosecuencia, se estableció la dinámica de la cobertura boscosa.

### Marco muestral

A partir de la estimación de la cronosecuencia, se pudieron identificar 445 propiedades de diferentes edades de abandono del bosque (tabla 2).

Con este marco muestral, se procedió a efectuar un muestreo aleatorio estratificado, siendo la clase etárea el estrato, esto es, los seis grupos etarios (tabla 3). El objetivo era obtener un esfuerzo muestral aproximadamente equivalente por estrato, lo cual permite contar con una aproximación a escala de paisaje ya que se muestrearon varias edades sucesionales en todas las islas, en otras palabras, tanto en Providencia como en Santa Catalina.

**Tabla 1.** Estudios sobre el BsT de las Islas de la vieja Providencia y Santa Catalina, objeto del análisis llevado a cabo en este artículo

| Estudio 1<br>Ruiz (2002)  | Estudio 2<br>Ruiz y Fandiño (2006a)   | Estudio 3<br>Ruiz y Fandiño (2006b)   |
|---|---|---|
| La sucesión secundaria del bosque seco tropical a través de una cronosecuencia entre 1944-2000 en la isla de Providencia, Colombia.<br>Tesis doctoral | Estructura y estimación no paramétrica de la riqueza total de especies del bosque seco tropical a través de una cronosecuencia teledetectada de más de 60 años en la Isla de Providencia, Colombia. Proyecto financiado por COLCIENCIAS, el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y la Universidad de La Salle en Bogotá, D.C. | Impacto del huracán Beta en los bosques de Providencia<br>Proyecto financiado por Coralina. |

**Tabla 2.** Número de propiedades de 45 x 70 m que conforman el marco muestral por clase etárea.

| Clase etárea en años | Número de propiedades |
|----------------------|-----------------------|
| < 6                  | 62                    |
| 6 a 10               | 43                    |
| 11 a 16              | 46                    |
| 17 a 31              | 52                    |
| 32 a 61              | 62                    |
| > 61                 | 180                   |
| Total                | 445                   |

### Caracterización de la vegetación

La tabla 4 muestra los principales aspectos de los tres estudios, en relación con la caracterización de la flora leñosa en las islas de la vieja Providencia y Santa Catalina, siguiendo el protocolo de Gentry (1982). Para cada cuadrante se censa toda la flora leñosa viva, con más de 2.5 cm de diámetro a la altura del pecho (DAP), perpendicular a la pendiente. Se mide el DAP de cada individuo a 1.3 m del suelo, o de cada fuste de este, si es del caso. En el evento de encontrar árboles que en su base son cónicos, se estima el DAP en el límite inferior cuando pasan a ser

**Tabla 3.** Esfuerzo muestral de cada uno de los estudios, mediante muestreo estratificado aleatorio simple.

| Clase etárea | Edad aproximada de la clase etárea en años | Número de cuadrantes muestreados |        |        | Total |
|--------------|--|----------------------------------|--------|--------|-------|
|              |  | Fase 1                           | Fase 2 | Fase 3 |       |
| 1            | < 6  | 6                                | 11     | 0      | 17    |
| 2            | 6 a 10                                     | 12                               | 4      | 0      | 16    |
| 3            | 11 a 16                                    | 13                               | 3      | 0      | 16    |
| 4            | 17 a 31                                    | 9                                | 8      | 2      | 19    |
| 5            | 32 a 61                                    | 7                                | 9      | 2      | 18    |
| 6            | > 61                                       | 12                               | 6      | 5      | 23    |
| Total        |  | 59                               | 41     | 9      | 109   |

**Tabla 4.** Aspectos generales de los tres estudios, en relación con la caracterización de la flora leñosa en Providencia y Santa Catalina, siguiendo el protocolo de Gentry (1982).

| Variable                             | Estudio 1 Ruiz (2002)*            | Estudio 2 Ruiz y Fandiño (2006a)                        | Estudio 3 Ruiz y Fandiño (2006b)** | TOTAL |
|--------------------------------------|-----------------------------------|---|------------------------------------|-------|
| Número de cuadrantes de 2 por 50 m   | 59                                | 41  | 9                                  | 109   |
| Raizal que apoyo el trabajo de campo | A. Duffis                         | H. Newball  | R. Robinson                        |       |
| Fecha de recolección de muestras     | diciembre de 2000 a enero de 2001 | julio a agosto de 2005 y diciembre 2005 a enero de 2006 | abril de 2006                      |       |
| Número de individuos                 | 2.056                             | 1.409   | 260                                | 3.725 |
| Número de fustes                     | 3.120                             | 1.993   | 403                                | 5.516 |
| Número de familias                   | 36                                | 24  | 13                                 | 39    |
| Número de géneros                    | 58                                | 37  | 19                                 | 61    |
| Número de especies                   | 72                                | 61  | 53                                 | 113   |

\* Nota: se excluyeron lianas.

\*\* Nota: este trabajo levanta 11 cuadrantes pero para el presente estudio se incluyen tan solo 9 cuadrantes puesto que los otros dos son duplicados exactos con individuos marcados.

cilíndricos. La altura se calcula con una vara si es menor a 5 m o visualmente si es mayor. Se anota su nombre vernacular, según cada uno de los tres raizales que asistieron el trabajo de campo. Se recolectaron *aproximadamente* 100 muestras de la flora leñosa. Todas las muestras vegetales de los tres trabajos se encuentran depositadas en el herbario Federico Medem (FMB) del Instituto de Investigación Alexander von Humboldt en Villa de Leyva, Boyacá, con 30 réplicas depositadas en el Museo de Historia Natural de la Universidad de La Salle, campus del centro en Bogotá, D. C. Las muestras recolectadas se compararon con otro material vegetal depositado en FMB, en particular el de **Morales** (2005). Lo anterior permitió adelantar una comparación de los ejemplares recolectados, a nivel de nombre científico, vernáculo, así como los ejemplares sin identificar, permitiendo reducir el número de especies desconocidas, o reportar la familia, género y en algunos casos hasta la especie. La identificación de los nuevos especímenes recolectados en el primer estudio (tabla 1) fue adelantada por R. Bernal, J. L. Fernández, E. Linares y J. C. Murillo del Herbario Nacional Colombiano (COL); P. E. Berry de la Universidad de Wisconsin (WIS, Madison, Wisconsin, EUA); R. Liesner, J. L. Matt, J. S. Miller, J. Pruski y C. M. Taylor del Missouri Botanical Garden (MO, Saint Louis, Missouri, EUA) y finalmente por F. R. Barrie del Field Museum (F, Chicago, Illinois, EUA) (**Ruiz y Fandiño**, 2007).

### Cálculo del Índice de Valor de Importancia

Con el Índice de Valor de Importancia (IVI) se midió de forma comprensiva el aporte de frecuencia, densidad y dominancia relativa de las especies leñosas, como una forma de ilustrar la composición de la flora leñosa. Se fusionaron en EXCEL los datos de abundancia por especie con nombre común y científico de los tres estudios. En caso de no contar con ninguno de los dos, se les dio un único número luego de las letras PD "Por determinar. El Índice de valor de importancia (IVI) (**Stiling**, 1999; **Lamprecht**, 1990) está compuesto por la suma de la densidad, frecuencia y dominancia relativas. Su máximo valor es de 300 e indica la importancia estructural de una especie en particular respecto a la comunidad florística muestreada, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$IVI = DeR + DoR + FR$$

Donde IVI = Índice de Valor de Importancia

DeR = Densidad Relativa

DoR = Dominancia Relativa

FR = Frecuencia Relativa

La densidad relativa se refiere al porcentaje de la suma de todas las "ocurrencias" de una especie en particular, respecto a la sumatoria de las ocurrencias de todas las especies de la misma comunidad o parcela. Se la calcula de la siguiente manera:

$$DeR = (E_i / \sum E) \times 100$$

Donde:

DeR = Densidad Relativa

$E_i$  = Numero de ocurrencias de la especie  $i$

$\sum E$  = Número total de individuos

La dominancia relativa se expresa como valor relativo de la sumatoria de las áreas basales de la siguiente manera:

$$DR = (AB_i / \sum AB) \times 100$$

donde:

DR = Dominancia relativa de la especie  $i$

$\sum AB_i$  = Sumatoria de las áreas basales de la especie  $i$

$\sum AB$  = Sumatoria de las áreas basales de todas las especies en la muestra

El área basal se calcula elevando al cuadrado el DAP de cada individuo o cada fuste, según el caso, y multiplicando el resultado por la constante 0.007854. El área basal se expresa en  $m^2 \text{ ha}^{-1}$ .

La frecuencia relativa de las especies mide su dispersión dentro la comunidad vegetal.

$$FR = (F_i / \sum F) \times 100$$

donde:

FR = Frecuencia relativa de la especie  $i$

$F_i$  = Número de cuadrantes donde la especie  $i$  ocurre

$\sum F$  = Sumatoria total de ocurrencias de todas las especies en todos los cuadrantes.

Adicionalmente, se calculó el mismo índice pero para familias en lugar de especie, haciendo los ajustes del caso.

### Cálculo de la distribución y frecuencia de especies

Los datos de abundancia de las especies encontradas en cada estudio, se consolidaron en un solo archivo. Siguiendo a **Magurran** (2004) se calcula la distribución y

frecuencia de las especies encontradas para probar el modelo de abundancia de especies más apropiado. La metodología para este punto consiste en hacer una matriz de las frecuencias de las distintas especies y graficarlas en una figura con el eje "Y" en escala logarítmica. La prueba estadística es el Chi cuadrado.

## Resultados

Los resultados de la dinámica de la cobertura boscosa corresponden al 70% de las islas aproximadamente, dado que el 30% restante se relaciona con cuerpos de agua, arena, coberturas impermeables, por ejemplo: vías, pista del aeropuerto, construcciones, entre otros, manglares y predios más pequeños a la unidad mínima de mapeo. De acuerdo a estos resultados la cobertura boscosa en las islas de la vieja Providencia y Santa Catalina tuvo una franca recuperación entre 1944 y 2000 (Ruiz *et al.*, 2005b), mientras que entre el 2000 y 2005 hubo pérdida del bosque. Se documenta que mientras para el período 1944 a

1969 hubo un decrecimiento del área boscosa, para 1984 se logró un crecimiento del bosque secundario y luego entre 1984 y 1990 vuelve a decrecer. De acuerdo a estos resultados, la recuperación del BsT observada entre 1944-2000 es la mayor registrada para los 60 años del periodo de observación, mientras que entre el 2000 y 2005 la cobertura boscosa se reduce a niveles comparables con los observados en 1990 por Ruiz (2002) (Figura 2).

Se censaron un total de 3.725 individuos con 5.516 fustes que reportaron 113 especies, 61 géneros y 39 familias (Tabla 4). De las muestras recolectadas en los tres estudios, 33 especímenes no se pudieron identificar ni siquiera a nivel de familia. El hecho que los tres estudios se hayan realizado primordialmente en la época seca dificultó la identificación de un mayor número de especies. Así mismo, el apoyo de tres raizales diferentes para el trabajo de campo, sin lugar a dudas, causó ruido en la identificación de especies por nombre común, ya que algunas especies tienen más de un nombre común.

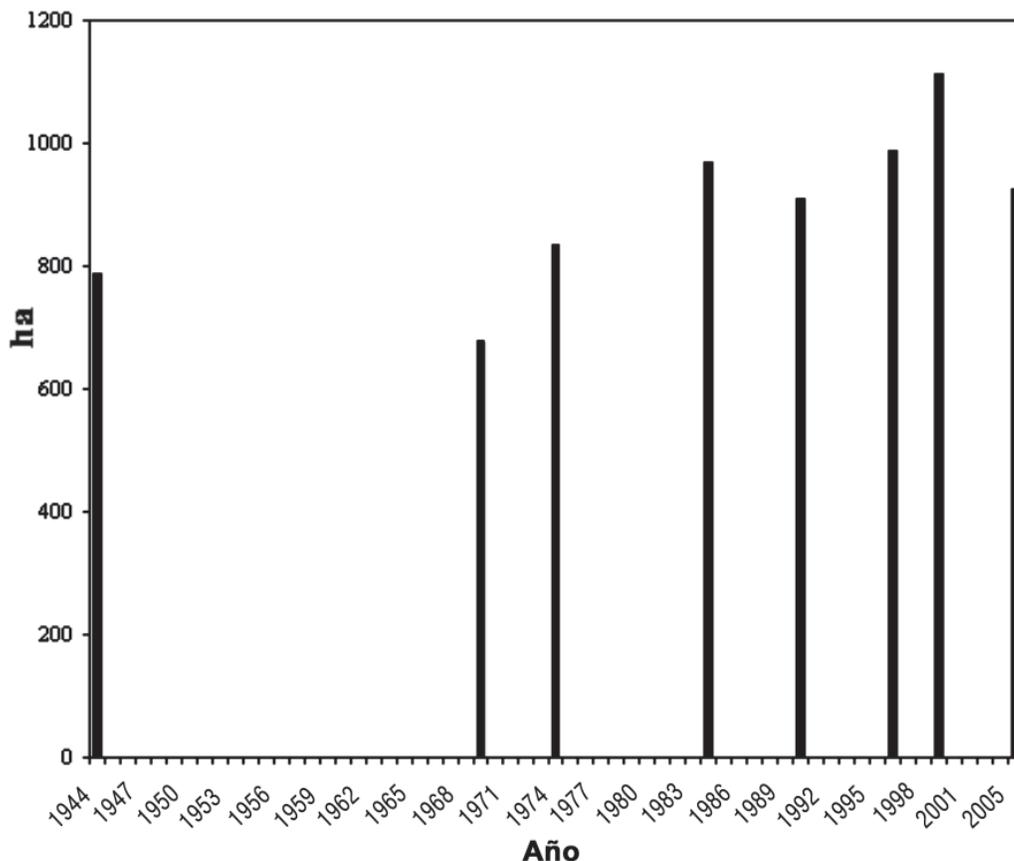


Figura 2. Cobertura del bosque seco tropical en las islas de la vieja Providencia y Santa Catalina en predios de al menos 45 por 70 m, 1944 a 2005.

La curva de abundancia relativa versus especies leñosas (figura 3) muestra una curva sigmoideal sugiriendo que las especies de abundancia intermedia son más comunes. Lo anterior sugiere que se trata de una curva log-normal, con una Chi-Cuadrado significativo, indicativa de una comunidad leñosa, grande, madura y variada (Magurran, 2004).

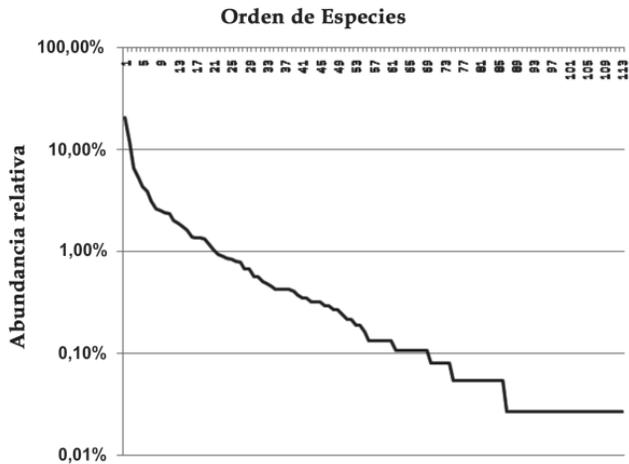


Figura 3. Abundancia relativa de las 113 especies leñosas encontradas en 109 cuadrantes de 2 x 50 m en Providencia y Santa Catalina, prueba de Chi-Cuadrado  $p < 0.05$ .

Por su parte, dado el alto valor reportado por la dominancia relativa, la familia con el mayor IVI es Anacardiaceae, una familia claramente asociada al BsT. (figura 4). Esta familia reporta cuatro especies de gran porte, entre las que

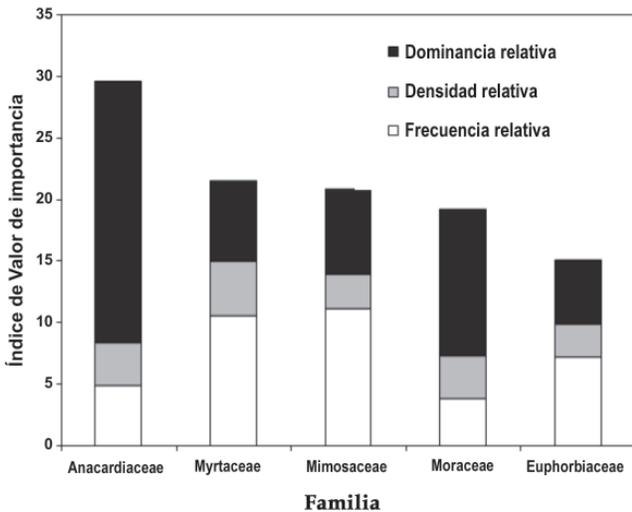


Figura 4. Las primeras cinco familias de especies leñosas del BsT de Providencia y Santa Catalina, con los Índices de Valor de Importancia (IVI) más altos, y los respectivos aportes de dominancia, densidad y frecuencia relativa.

se encuentran el mango (*Mangifera indica* L.), *Metopium brownei* Jacq. Urb.), Hog plum (*Spondias mombin* L.) y (*Spondias purpurea* L.). Le siguen las familias Myrtaceae con cinco especies y Mimosaceae con tres especies, pero no por el considerable aporte de las áreas basales, como es el caso de Anacardiaceae, sino principalmente por su frecuencia relativa. En otras palabras, estas dos familias fueron frecuentemente encontradas en los sitios muestreados pero, se trata de árboles que no son de gran porte como es el caso de Cock spur (*Acacia collinsii* L.) o Round Berries (*Campomanesia* sp.). Entre estas cinco familias con más altos IVI, sobresale Myrtaceae por tener el mayor valor en lo que respecta a densidad relativa, atribuible a lo prevalente que es Round Berries. Finalmente están Moraceae con tres especies, entre las que se encuentra el Higo (*Ficus trigonata* L.) y Euphorbiaceae con cuatro con especies como el Goat wood (*Croton glabellus*).

La figura 5 muestra las primeras cinco especies con los Índices de Valor de Importancia (IVI) más altos y los respectivos aportes de dominancia, densidad y frecuencia relativa. Cock spur (*Acacia collinsii* Saff.) presenta el mayor índice de valor de importancia atribuible principalmente al elevado número de ocurrencias de esta especie en los cuadrantes levantados. Es sin lugar a dudas la especie leñosa más común en el bosque. Enseguida se encuentra Round Berries (*Campomanesia* sp.) que exhibe una dominancia y frecuencia relativa muy similar a Cock spur, siendo la densidad relativa un poco menor. En otras palabras, tanto Cock spur como Round Berries son especies muy comunes en el archipiélago. Hog plum (*Spondias*

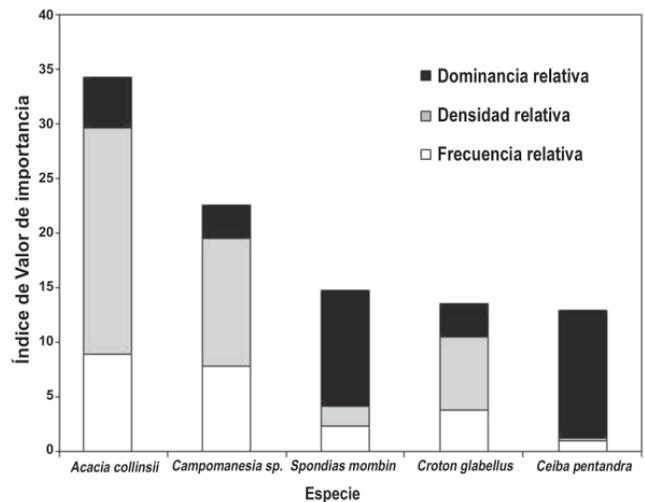


Figura 5. Las primeras cinco especies de flora leñosa del BsT de Providencia y Santa Catalina, con los Índices de Valor de Importancia (IVI) más altos, y los respectivos aportes de dominancia, densidad y frecuencia relativa.

*mombin* L.) es la especie arbórea que ocupa el tercer lugar del IVI, principalmente por su gran porte y por ende su contribución de área basal, siendo sobrepasada en este aspecto tan solo por otro árbol de gran tamaño como lo es la Ceiba (*Ceiba pentandra* (L.) Gaertn), que ocupa el quinto lugar. El cuarto lugar lo registra el Goat wood (*Croton glabellus* L.) un árbol que alcanza 10 m de altura, que es común en el archipiélago.

## Discusión

Con más de 3500 individuos censados, consideramos que la representación de la flora leñosa de Providencia es robusta.

La flora aquí descrita con base en los cinco primeros IVIs a nivel de familia y especie, nos indica que los bosques de Providencia son característicos del BsT. Adicionalmente, encontramos que hay especies de fauna que también se encuentra asociada al BsT, tal es el caso de la tortuga Morrocoy (*Geochelone carbonaria*), de ecología de este bosque, la cual fue supuestamente introducida en Providencia (Castaño-Mora, 2002). Como en otros BsT, vemos varias características a resaltar: presencia de cactáceas como el Dildoc (*Acanthocereus pentagonus* (L.) Britton & Rose), lianas como por ejemplo la familia Dilleniaceae, palmas como Wild pop thatch (*Acoelorrhaphe wrightii* (Grisen. & H. A. Wendl.) Sobre este particular, cabe anotar que dos de las especies de palmas se encuentran clasificadas en peligro según el libro rojo de UICN. También se encuentran en el BsT del Providencia y Santa Catalina, plantas espinosas como el Prickly yellow (*Zanthoxylum martinicense* (Lam.) DC). Aunque las anteriores especies no alcanzaron a ubicarse entre los primeros cinco IVI reportados fueron reportados en Ruiz y Fandiño (2007) o González *et al.*, 1995. Además se encuentran un buen número de especies caducifolias como Round Berries (*Campomanesia* sp.), muchos árboles de hojas pequeñas o micrófilas, como el Wild tamarind (*Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit) salvo contadas excepciones como el trompeta (*Cecropia peltata* L.).

La flora de las islas de Providencia y Santa Catalina es muy diversa, tal y como lo evidencia el modelo log-normal, propio de bosques en buen estado. Lo anterior, sumado a la tendencia general observada de recuperación del bosque en los últimos 60 años, representan evidencias a la anotación de Gentry en el libro de González *et al.* 1995, siendo la flora leñosa del archipiélago un juego de la flora mesoamericana y antillana, más afín a esta última (Ruiz y Fandiño, 2007). El trabajo de Morales (2005) concluye una mayor afinidad florística con las Antillas, no obstante este

trabajo es exclusivo de la zona del Peak. Con el trabajo de González *et al.*, (1995) así como el de Lowy (2000), no es posible discernir cual flora es reportada para San Andrés y cuál para Providencia.

La diferencia positiva del IVI de *Acacia collinsii* Saff., una especie leñosa, dura, y asociada a ecosistemas secos (Steward & Dunson, 1994), resulta significativa frente a los demás valores del IVI reportados para las otras especies, posiblemente porque esta especie es pionera e indicadora de bosques secundarios que han sido intervenidos, o que están sufriendo un proceso de regeneración, característica de la mayor parte del bosque de las islas. Además, esta especie se encontró incluso en los bosques que albergan árboles de gran porte. Cabe anotar que las especies que presentaron un mayor índice de valor de importancia presentan una alta distribución en los bosques secos que circundan las islas y que pueden estar poblándola seguramente por sus habilidades de dispersión.

Finalmente, sin lugar a dudas el BsT de Providencia y Santa Catalina exhibe bosques muy ricos en especies y en buen estado de conservación. Por lo que se puede considerar como banco genético *in situ* de especies que alguna vez poblaron las islas antillanas (Morales, 2005). Este banco es importante en vista de que es posible que el bosque seco primario, independientemente de su uso pasado, se recupere (Romero-Duque *et al.*, 2007). Empero, el archipiélago es extremadamente pequeño y por lo tanto con poca resistencia al disturbio.

## Agradecimientos

Parte de esta investigación se adelantó en la jurisdicción del Parque Nacional Natural Old Providence y McBean Lagoon, gracias al permiso de investigación 229 de la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales. La colecta de especies estuvo amparada por el permiso de investigación 006 y la resolución 598 del 15 de agosto de 2006 de CORALINA. Este artículo fusiona tres trabajos de investigación, en primer lugar la tesis doctoral de Jorge Ruiz (2002) en la University of Connecticut, el proyecto de investigación financiado por la Universidad de La Salle (Proyecto No. PINV-013-05), el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH) y COLCIENCIAS (Proyecto Número 1243-13-16640), y por último el proyecto sobre el impacto del Huracán Beta financiado por CORALINA. Agradecemos el soporte prestado por María Cristina Durán y Camilo Cárdenas de COLCIENCIAS, así como de la Dra. María de Jesús Restrepo y Alexander Cotte del Departamento de Investigaciones de la Universidad de La Salle. La identifi-

cación de especies a nivel de nombre común fue posible gracias a los raizales Asmond Duffis (Q. E. P. D.), Hawthorne Newball, y Regino Robinson. Agradecemos el apoyo logístico prestado en el archipiélago por Marcela Cano de Parques Nacionales, así como por Elizabeth Taylor, Martha Prada y Fanny Howard de CORALINA. Reconocemos la calurosa hospitalidad brindada por la familia Talero durante nuestras salidas de campo y el apoyo logístico gentilmente ofrecido del Ing. Juan Manuel Orozco. Finalmente, deseamos reconocer las correcciones y sugerencias de un evaluador anónimo nombrado por la ACCEFYN y a Miguel Ángel Romero la corrección de estilo. Esta es una publicación oficial del grupo Caldas registrado con el número COL0021613 en el GrupLac de Colciencias.

### Bibliografía

- Arango, N., Armenteras, D., Castro, M., Gottsmann, T., Hernandez, O.L., Matallana, C.L., Morales, M., Naranjo, L.G., Rengifo, L.M., Trujillo, A.F., y H. Villarreal. 2003. Vacíos de conservación del sistema de parques nacionales naturales de Colombia desde una perspectiva ecorregional. WWF Colombia, Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia. 64 p.
- Arango-V, N. y J.M., Diaz-M. 2006. Representatividad del sistema de áreas protegidas de Colombia. Tomo I. 272-286 p. En: Chaves, M.E. y Santamaria, M. (eds). 2006. Informe sobre el avance en el conocimiento y la información de la biodiversidad 1998-2004. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C., Colombia. 2 tomos.
- Armenteras, D., Gast, F. & Villarreal H. 2003 Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. *Biological Conservation* **113**: 245 – 256.
- Cabrera, E. & Galindo G. A. 2006. Aproximación metodológica para la delimitación de ecosistemas de enclaves secos. Caso piloto: Cañones del río Dagua y del río Tuluá, Valle del Cauca – Colombia. Bogotá, D. C. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Castaño-Mora, O. V. (Ed.) 2002. Libro rojo de reptiles de Colombia. Bogotá, D. C. Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente, Conservación Internacional.
- Chávez M. & N. Arango (Eds.) 1988. Informe nacional sobre el estado de la biodiversidad en Colombia. Bogotá, D. C.: Ministerio del Medio Ambiente/United Nations.
- Díaz, J. M. 2006. Bosque seco tropical en Colombia. Cali: Banco de Occidente.
- Etter, A. 1993. Diversidad ecosistémica en Colombia hoy. Bogotá: CEREC/Fundación Alejandro Ángel Escobar.
- Gardner, T. A. 2006. Tree-grass coexistence in the Brazilian cerrado: demographic consequences of environmental instability. *Journal of Biogeography* **33**:448-463.
- Gentry, A. H. 1982. Patterns of Neotropical plant species diversity. *Evolutionary Biology* **15**:1-84.
- Gentry, A. H. 1996. Diversity and floristic composition of Neotropical dry forest. En: Bullock S, Medina EHA, Mooney HA (Editores). *Tropical deciduous forest Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gonzalez-Carranza, Z., Berrio, J. C. Hooghiemstra, H., Duivenvoorden, J. F. & Behling, H. 2008. Changes of seasonally dry forest in the Colombian Patia Valley during the early and middle Holocene and the development of a dry climatic record for the northernmost Andes. *Review of Palaeobotany and Palynology en imprenta*.
- Gonzalez, F, Díaz J. N. & Lowy, P. 1995. An illustrated flora of San Andrés and Providencia. Bogotá: SENA.
- Hartter, J., Lucas, C., Gaughan, A. E. & Aranda, L. L. 2008. Detecting tropical dry forest succession in a shifting cultivation mosaic of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Applied Geography* **28**:134-149.
- IDEAM, IGAC, IAvH, Invemar, Sinchi, IIAP, 2007. Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Bogotá: IDEAM, IGAC, IAvH, Invemar, Sinchi, IIAP.
- IDEAM, SINCHI, IAvH, IIAP, INVEMAR. 2002. Sistema de información ambiental de Colombia (SIAC). Tomo 2, Primera generación de Indicadores de la línea base de la información ambiental de Colombia.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (1998). Bosque seco tropical. En: Chávez M. y N. Arango (Editores) Tomo 1 pp 56-71. *Informe nacional sobre el estado de la biodiversidad en Colombia*. Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente/United Nations.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, IAvH. (2002a). Análisis preliminar de representatividad ecosistémica e identificación de vacíos de conservación y alternativas para el SIRAP del Departamento del Valle del Cauca utilizando sistemas de información geográfica. Informe interno. Bogotá, Colombia. 48p.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, IAvH. (2002b). Caracterización biótica del corredor oriental de conservación para el SIRAP Huila. Informe interno. Bogotá, Colombia. 172 p.
- Janzen, D. H. 1988. Management of habitat fragments in a tropical dry forest: growth. *Annals of the Missouri Botanical Garden* **75**:105-116.
- Lamprecht, H. 1990. Silvicultura en los trópicos. Traducido del alemán por A. Cacillo. Eschborn, Alemania, GTZ. 365 p.
- Lowy, P. D. 2000. Flora vascular terrestre del archipiélago de San Andrés y Providencia. *Biota Colombiana* **1**:109-124.
- Magurran, A. E. 2004. *Measuring biological diversity*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Márquez, G. 2004. Mapas de un fracaso naturaleza y conflicto en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Estudios Ambientales, IDEA No. 5.

- Mendoza, C. H.** 1999. Estructura y riqueza florística del bosque seco tropical en la región Caribe y el valle del Río Magdalena, Colombia. *Caldasia* **21**:70-94.
- Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C. May, I., Blyth, S., Kapos, V. & Gordon, J. E.** 2006. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography* **33**:491-505.
- Mooney, H. A., S. H. Bullock, & E. Medina.** 1996. Introducción. Pp 1-6. En: Bullock, S. H., H. A. Mooney, E. Medina (Eds.) *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
- Morales D. A.** 2005. Estudio de la flora del bosque seco caribeño de la isla de Providencia (Colombia) en el área del *Peak* y análisis de su afinidad geográfica. Bogotá, DC: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Departamento de Ecología, trabajo de grado presentado para obtener el título de Ecólogo.
- Morales M.M.** 2004. La presencia de la Asociación Red de Reservas Naturales de la Sociedad Civil en los Andes colombianos. Variaciones en los últimos dos años. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Informe interno. Bogotá, Colombia. 14 p + anexos.
- Pennington, R. T, Lewis, G. P. & Ratter, J. A.** 2006. Neotropical Savannas and Seasonally Dry Forests: Plant Diversity, Biogeography, and Conservation. Boca Raton, FL: Taylor and Francis.
- Prance, W.** 2006. Tropical savannas and seasonally dry forests: an introduction. *Journal of Biogeography* **33**:385-386.
- Repizo, A. A. & Devia, C. A.** 2008. Árboles y arbustos del valle seco del río Magdalena y e la región Caribe colombiana: su ecología y usos. Bogotá, D. C. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana.
- Romero-Duque, L. P., Jaramillo, V. J., Perez-Jimenez, A.** 2007. Structure and diversity of secondary tropical dry forests in Mexico, differing in their prior land-use history. *Forest Ecology and Management* **253**:38-47.
- Ruiz, J. & Fandiño, M. C.** 2007. Plantas leñosas del bosque seco tropical de la Isla de Providencia, Colombia, Caribe occidental. *Biota Colombiana*, **8**:87-98.
- Ruiz, J. & Fandiño, M. C.** 2006a. Estructura y estimación no paramétrica de la riqueza total de especies del bosque seco tropical a través de una cronosecuencia teledetectada de más de 60 años en la Isla de Providencia, Colombia. Bogotá: Informe Final Proyecto1243-13-16640 presentado a COLCIENCIAS. Proyecto financiado por COLCIENCIAS, la universidad de La Salle y el Instituto Alexander von Humboldt.
- Ruiz, J. & Fandiño, M. C.** 2006b. The impact of hurricane Beta on the forests of Providencia Island, Colombia, southwest Caribbean. San Andrés Isla: CORALINA.
- Ruiz, J., Fandiño M. C. & Chazdon R. L.** 2005a. Vegetation Structure, Composition, and Species Richness Across a 56-year Chronosequence of Dry Tropical Forest on Providencia Island, Colombia. *Biotropica* **37**:520-530
- Ruiz, J., Fandiño M. C., Meyer, T. H. & Ortega I. M.** 2005b. Cambio de la cobertura boscosa en Providencia. *Revista de Investigación, Universidad de La Salle* **5**:141-153.
- Ruiz, J.** 2002. Long-term seasonally dry tropical forest succession after human disturbance in Providencia Island, Colombia. Storrs, CT: University of Connecticut, tesis de grado para optar el título de Ph. D. en Recursos Naturales.
- Silva, J. F., Fariñas, M. R., Felfil, J. M. & Klink, C. A.** 2006. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the cerrado region of Brazil. *Journal of Biogeography* **33**:536-548.
- Stewart, J. L & Dunsdon, A. J.** 1994. Performance of 25 Central American dry zone hardwoods in a pantropical series of species elimination trials. *Forest Ecology and Management* **65**:183-193.
- Stiling, P.** 1999. *Ecology: Theories and applications*. New Jersey: Prentice Hall, 3<sup>rd</sup>. Edition.
- Valdés, C., Cárdenas, F., Devia, C. A.** 1997. Paisajes culturales y sistemas de producción en las islas de Providencia y Santa Catalina (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*. **6 y 7**:29-71.
- Winograd, M.** 1995. Indicadores Ambientales para Latinoamérica y el Caribe: Hacia la sustentabilidad en el uso de tierras. GASE Grupo de Análisis de Sistemas Ecológicos. Proyecto IICA/GTZ, OEA y WRI. Costa Rica: San José.

Recibido: abril 28 de 2008.

Aceptado para su publicación: febrero 24 de 2009.



# NUEVOS APORTES A LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDROCARBUROS EN COLOMBIA

Por

Carlos Alberto Vargas Jiménez<sup>1</sup>

## Resumen

**Vargas Jiménez, C. A.:** Nuevos aportes a la estimación del potencial de hidrocarburos en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(126): 17-43, 2009. ISSN 0370-3908.

Una evaluación sistemática sobre los diferentes estudios previos para estimar el potencial geológico asociado a los hidrocarburos convencionales en las cuencas sedimentarias de Colombia permite identificar un amplio espectro de resultados.

En este trabajo se presenta una síntesis de los rasgos sobresalientes de las cuencas sedimentarias, así como su potencial derivado de aproximaciones probabilísticas. Los resultados de OOIP para los percentiles  $P_{10} - P_{90}$  son del orden de 1.368.621,4 – 569.024,4 MBPE con un valor promedio de 930.758,8 MBPE. Bajo escenarios conservadores estos rangos con riesgo geológico máximo del 30% y factor de recobro máximo de 20% podrían sugerir un recurso prospectivo recuperable en el rango de 82.117,3 y 34.141,5 MBPE.

**Palabras clave:** OOIP, Potencial de hidrocarburos, método de Monte Carlo, cuencas sedimentarias de Colombia.

## Abstract

A systematic evaluation of studies carried out by several precedent authors to estimate the geological potential related to conventional hydrocarbons in the sedimentary basins of Colombia identifies a broad spectrum of results.

This paper also presents a summary of some relevant characteristics of the sedimentary basins and their potential derived from probabilistic approaches. The results of OOIP for the percentiles  $P_{10} - P_{90}$  are between 1.368.621,4 – 569.024,4 MBOE with a mean value of 930.758,8 MBOE. Using conservative scenarios and assuming a geological risk about 30% and a recovery factor of 20% the prospective recoverable resource could be in the range of 82,117.3 and 34,141.5 MBOE.

**Key words:** OOIP, hydrocarbons Potential, Statistical Method of Monte Carlo, Sedimentary basins of Colombia.

<sup>1</sup> Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. [cavargasj@unal.edu.co](mailto:cavargasj@unal.edu.co)

## Introducción

La producción de hidrocarburos en Colombia comenzó en 1921 con la firma de las concesiones Barco y De Mares, que incluyeron las regiones del Catatumbo en límites con Venezuela, y las del Opón-Carare, en el Magdalena Medio. Tras la reversión de la Concesión De Mares, el 25 de agosto de 1951 se dio origen a la Empresa Colombiana de Petróleos - Ecopetrol, que había sido creada en 1948. Por más de tres décadas esta empresa dedicó esfuerzos para sistematizar la exploración e incorporar nuevo conocimiento para la definición de las cuencas sedimentarias en la esquina NW de América del Sur.

**Ecopetrol** (1980), en el marco del Estudio Nacional de Energía, publica un informe sobre Cuencas Sedimentarias Colombianas, que incluye mapas, columnas estratigráficas y generalidades del sistema petrolífero de trece (13) cuencas. **Govea y Aguilar** (1985) presentan nuevas definiciones y descripciones de las trece (13) cuencas sedimentarias antedichas, asumen que el origen de estas cuencas está relacionado con la orogenia andina y las tipifican dentro de la clasificación de **Kingston et al.** (1983). Tres grupos fueron reconocidos: 1) Cuencas continentales: Llanos Orientales, Putumayo, Valle Medio del Magdalena, Valle Superior del Magdalena, Catatumbo, Cesar – Ranchería, Sabana de Bogotá, Amazonas y Los Cayos; 2) Cuencas de borde continental: Valle Inferior del Magdalena y Guajira; 3) Cuencas oceánicas: Chocó – Pacífico y Cauca – Patía.

Posteriormente, **Ecopetrol** (2000) elabora un mapa con una división en 18 cuencas sedimentarias, el cual fue modificado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) en su mapa de tierras del año 2007 (**Barrero et al.**, 2007). La ANH divide el país en 21 cuencas sedimentarias (Figura 1): 1) Amagá; 2) Caguán-Putumayo; 3) Catatumbo; 4) Cauca-Patía; 5) Cesar-Ranchería; 6) Chocó; 7) Chocó Marino (*offshore*); 8) Colombia; 9) Colombia Pacífico; 10) Cordillera Oriental; 11) Guajira; 12) Guajira Marino (*offshore*); 13) Los Cayos; 14) Llanos Orientales; 15) Sinú-San Jacinto; 16) Sinú Marino (*offshore*); 17) Tumaco; 18) Tumaco Marino (*offshore*); 19) Urabá; 20) Valle Inferior del Magdalena; 21) Valle Medio del Magdalena; 22) Valle Superior del Magdalena; 23) Vaupés-Amazonas.

Según la nueva versión de cuencas sedimentarias (**Barrero et al.**, 2007), las áreas potencialmente petrolíferas cubren 1.644.179 km<sup>2</sup>, de las cuales el 50.42% corresponde a las cuencas marinas. A nivel de densidad de Geoinformación **Vargas et al.**, (2007) indican que en Colombia no se tiene una cobertura óptima de información, por lo que la incertidumbre con respecto a la estimación de potencial petrolífero es alta. En consecuencia,

los trabajos adelantados para la estimación del recurso hidrocarburífero de Colombia reflejan un amplio espectro de cifras.

En este trabajo se presenta una síntesis de las características de las cuencas planteadas por la ANH en el 2007 y se describe su potencial hidrocarburífero en términos probabilísticos basados en información de cada cuenca, o de cuencas análogas.

## Antecedentes

La diversidad de metodologías y la naturaleza de los datos empleados en la estimación de las reservas y recursos hidrocarburíferos en Colombia han generado una amplia gama de cifras. La evolución histórica de la exploración en Colombia y las expectativas sobre el potencial en picos de demanda mundial probablemente coadyuvaron en dichas cifras. Se presenta a continuación un resumen general sobre los estudios más relevantes realizados en las últimas dos décadas, con el ánimo de establecer órdenes de magnitud y variabilidad de los resultados.

**Govea y Aguilar** (1985) hacen una descripción de trece (13) cuencas sedimentarias y a partir de una actualización de los estudios de **Bendeck** (1985) e **Ivanhoe** (1982), presentan un estimativo de reservas descubiertas (3.678 MBPE) y por descubrir (1.883 MBPE).

**Ortiz** (1997) da a conocer un cálculo del potencial de hidrocarburos basado en datos de producción y distribución de campos (Tabla 1). El autor obtiene estos resultados a partir de un modelo de geometría fractal aplicado a varias de las cuencas sedimentarias, haciendo un ajuste parabólico de los datos. Se nota, como en otros trabajos previos a la publicación del trabajo de la **SPE/WPC/AAPG (2001)**, que el concepto de “reservas” allí planteado se refiere a volúmenes para cada caso; el de “potencial” correspondería al recurso total (total petroleum initially in place); hallazgo se refiere a “reservas probadas” más volúmenes contingentes y “por descubrir” estaría relacionado con otras reservas (probables + posibles), recursos contingentes, recursos prospectivos y recursos no recuperables. De este modo, el cálculo de reservas probadas para 1997, según **Ortiz** (1997), es de 10.940 MBPE. Si al potencial total se calcula una recuperación del 23%, se obtendría una reserva total de 15.800 MBPE.

**Mora** (2000) adelanta un estudio del potencial de los sistemas petrolíferos en las cuencas del Putumayo, Valle Superior del Magdalena, Catatumbo y Llanos Orientales; concluyendo que en las cinco cuencas existen unas reservas aproximadas de 18.376 MBPE. Se plantea la posibilidad de encontrar campos gigantes en las cuencas

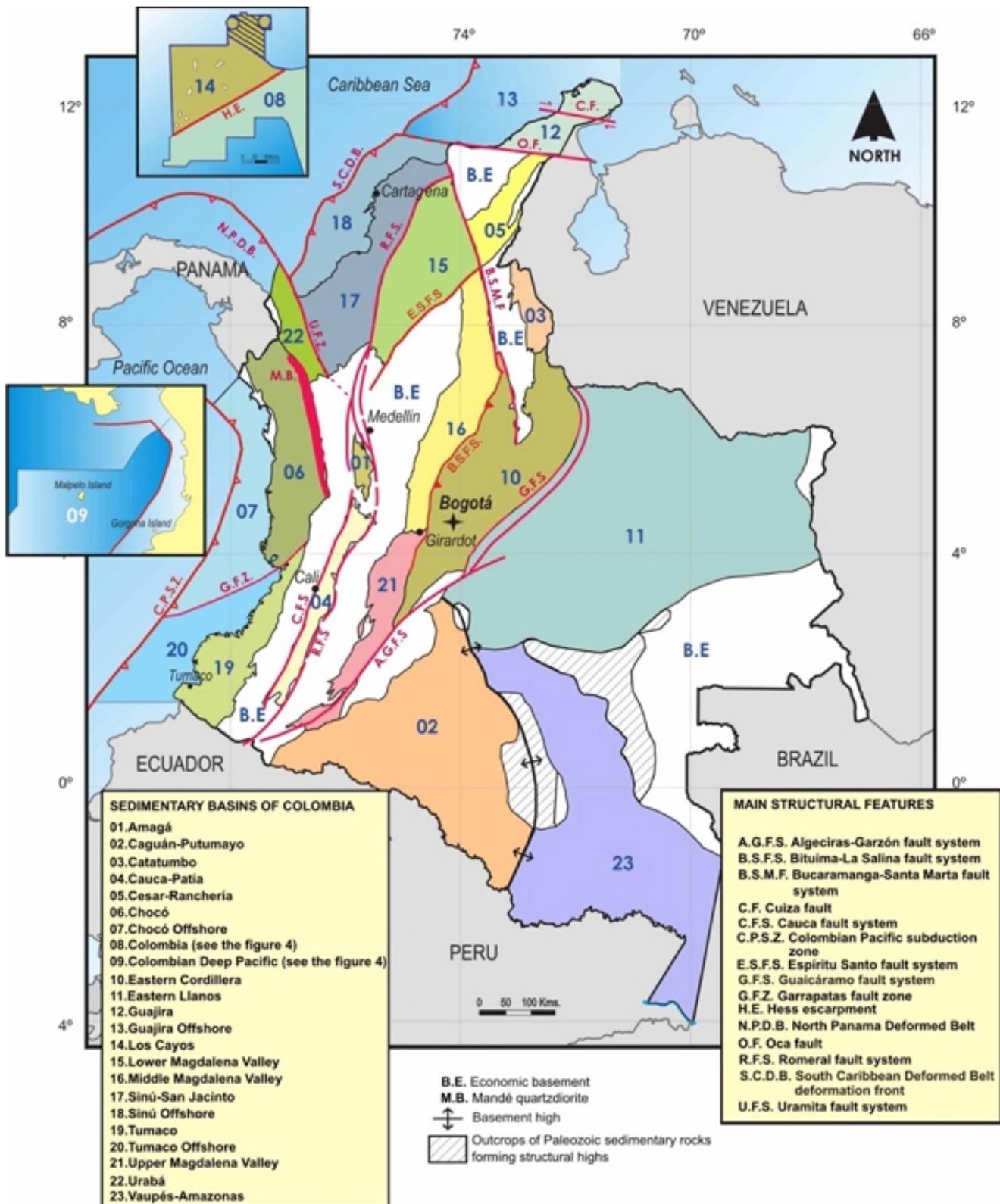


Figura 1. Nomenclatura y límites actuales de las cuencas sedimentarias de Colombia (Barrero et al., 2007).

**Tabla 1.** Cálculo del Potencial de HC, **Ortiz** (1997). J, G, M y P se refieren al tamaño del campo: gigante, grande, mediano y pequeño respectivamente. MBPE: Millones de barriles de petróleo equivalentes.

|               | RESERVAS MBPE | CAMPOS |     |     |       |       |
|---------------|---------------|--------|-----|-----|-------|-------|
|               |               | J      | G   | M   | P     | TOTAL |
| POTENCIAL     | 68.900        | 21     | 240 | 485 | 1,791 | 2,537 |
| HALLAZGOS     | 10.940        | 5      | 21  | 45  | 162   | 233   |
| POR DESCUBRIR | 57.960        | 16     | 219 | 440 | 1,629 | 2,304 |

de Valle Medio del Magdalena y Llanos Orientales; campos medianos en las cuencas de Valle Superior de Magdalena y el Catatumbo, y campos pequeños en la Cuenca del Putumayo.

El **USGS** (2001) estimó un potencial prospectivo de aceite para Colombia entre 1.286 y 10.846 MBP en función de las cuencas de Valle Medio del Magdalena y Llanos Orientales. Para el caso de gas estiman un rango 1.095 y 12.138 GPC basado en las mismas cuencas. De acuerdo a lo anterior, el potencial prospectivo propuesto por el USGS se encuentra en el rango entre 1.481 y 13.013 MBPE, aproximadamente.

**Arthur D'Little** (2006), toma como reservas probadas de crudo, el valor de 1.602 MBPE, dado por Ecopetrol en sus reportes anuales e indica que con este valor, el dato normal de las reservas totales sería de 6.570 MBPE. Para el gas, toma el valor de **Ecopetrol** (2005) de 4.1 TPC (Tera pies cúbicos) y encuentra que, dependiendo del sesgo con que se consideren las reservas, éstas estarían entre 14.3 TPC (sesgo aceite) y 26.4 TPC (sesgo gas) que con un factor de 5.700pc por BPE, daría unos 3.500 MBPE, lo cual supone una reserva total de hidrocarburos del orden de 10.000 MBPE.

El **ZIFF ENERGY GROUP** (2007), lleva a cabo un trabajo sobre reservas y potencial de hidrocarburos en Colombia. Sus resultados indican 12.034 MBPE en reservas probadas, 4.074 MBPE en reservas probables y 27.391 MBPE en reservas posibles, para un total de 43.500 MBPE. Nuevamente se asume que el potencial es la suma de las reservas. Aquí, el valor dado para las reservas probadas, se acerca al de reserva total calculado por Ecopetrol y Arthur D'little.

**Halliburton** (2007) realiza un estudio determinístico con la información disponible en el sector de costa afuera del Caribe orientado a la evaluación de su potencial y conceptos exploratorios, indicando un potencial de gas de 50 TPC.

**IHS** (2008), determina un total recuperable basado en metodología fractal sobre campos en producción (asociado a reservas probadas) de 13.668 MBPE y calcula que en el caso base, quedarían por descubrir (*Yet to Find*) unos

3.929 MBPE y en caso optimista o alto, quedarían por descubrir 13.874 MBPE (Recursos prospectivos).

La **Universidad Industrial de Santander** (2008) realiza un estudio de integración de la información geológica y geofísica disponible para las cuencas de Cesar y Ranchería, estimando un potencial para este sector entre 2.000 – 10.700 MBPE.

La **Universidad Nacional de Colombia** (2008) indica un potencial de hidrocarburos en el rango de 19-55 MBPE para el Bloque de Soapaga, en la Cordillera Oriental. Al extender los conceptos exploratorios a la cuenca de la Cordillera Oriental, estima un potencial de 532 – 1.540 MBPE para ésta.

Para la franja de Crudos Pesados en la Cuenca de los Llanos Orientales, **Halliburton** (2008) calcula unas reservas probadas de 187 MBPE, probables  $P_{50}$  de 767 MBPE, un STOOIP (Stock tank original oil in place) con riesgo  $P_{50}$  de 124.249 MBPE y unos recursos potenciales (OIL  $P_{50}$ ) de 22.927 MBO. Considerando los factores de riesgo, Halliburton (2008) indica que podría existir un recurso cercano a 124.000 MBPE, de los cuales el 0.62% se han calculado como reservas probables (con una recuperabilidad cercana al 12%).

La **Universidad Industrial de Santander** (2009) realizó una estimación del potencial de petróleo y gas en once (11) cuencas sedimentarias de Colombia: Llanos, Catatumbo, Valle Inferior del Magdalena, Valle Medio del Magdalena, Valle Superior del Magdalena, Caguán – Putumayo, Vaupés – Amazonas, Sinú – San Jacinto, Cauca – Patía, Cesar – Ranchería y Guajira. En su trabajo utilizan el método de balance de masas con datos geoquímicos y petrofísicos disponibles e inferidos. Sugieren que el potencial de estas cuencas se encuentra entre 37.000 y 296.000 MBPE.

La Figura 2 y la Tabla 2 sintetizan todos los estudios realizados hasta el momento. Como se aprecia, existe una alta variabilidad de cifras como respuesta a las diversas metodologías usadas, propósitos de la estimación y áreas donde se han desarrollado.

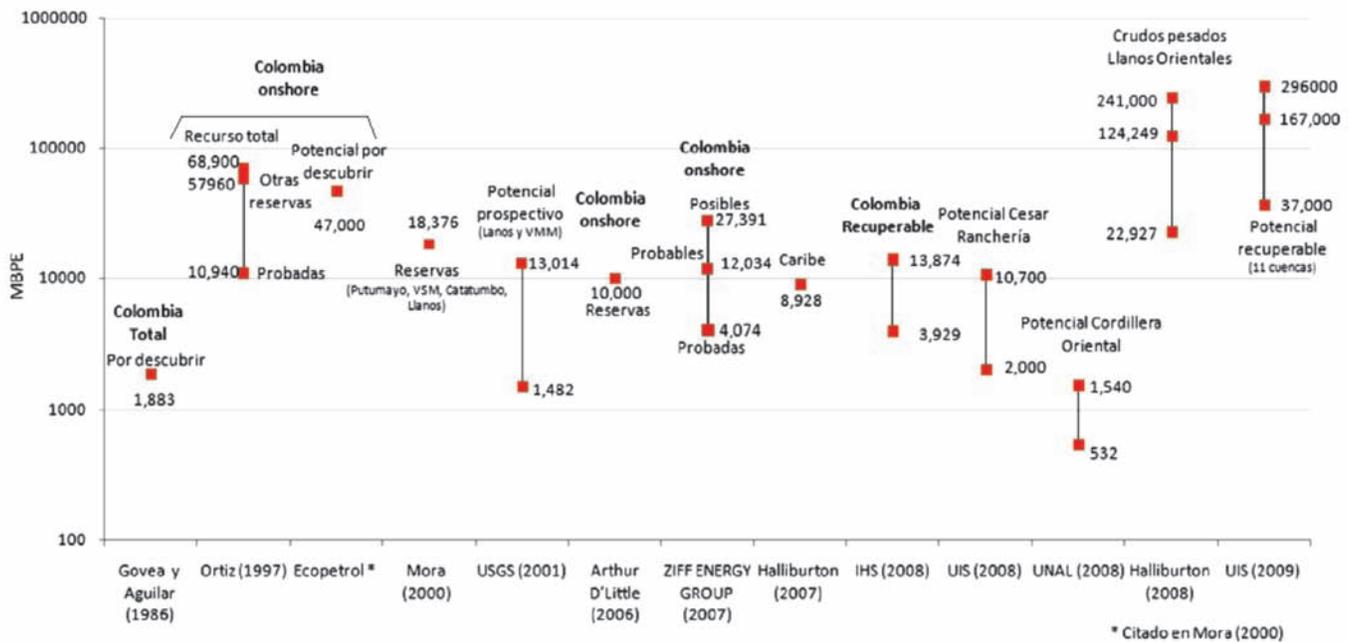


Figura 2. Resultados de los estudios aquí mencionados sobre el potencial hidrocarburífero de Colombia.

Tabla 2. Estudios mencionados sobre el potencial hidrocarburífero de Colombia.

| Autor                    | Cuencas de Influencia                             | Reservas (MBPE) |           |         |                      | Potencial por descubrir (MBPE) | Total/Rango (MBPE) |
|--------------------------|---|-----------------|-----------|---------|----------------------|--------------------------------|--------------------|
|                          |   | Probadas        | Probables | Posible | Otras/sin clasificar |                                |                    |
| Govea & Aguilar (1986)   | Todas   |                 |           |         |                      | 1,883                          | 1,883              |
| Ortiz (1997)             | On shore  | 10,940          |           |         | 57,960               |                                | 10,940 - 68,900    |
| ECOPETROL (2000)*        | On shore  |                 |           |         |                      | 47,000                         | 47,000             |
| Mora (2000)              | Putumayo, VSM, Catatumbo, Llanos                  |                 |           |         | 18,376               |                                | 18,376             |
| USGS (2001)              | Llanos, VMM                                       |                 |           |         |                      | 1,482 - 13,014                 | 1,482 - 13,014     |
| Arthur D'Little (2006)   | On shore  |                 |           |         | 10,000               |                                | 10,000             |
| Ziff Energy Group (2007) | On shore  | 4,074           | 12,034    | 27,391  | 10,000               |                                | 4,074 - 27,391     |
| Halliburton (2007)       | Caribe Offshore (Guajira, Sinú San Jacinto-Urabá) |                 |           |         |                      | 8,928                          | 8,928              |
| IHS (2008)               | Todas   |                 |           |         |                      | 3,929 - 13,874                 | 3,929 - 13,874     |
| UIS (2008)               | Cesar - Ranchería                                 |                 |           |         |                      | 2,000 - 10,700                 | 2,000 - 10,700     |
| UNAL (2008)              | Cordillera Oriental                               |                 |           |         |                      | 532 - 1,540                    | 532 - 1,540        |
| Halliburton (2008)       | Llanos Orientales                                 |                 |           |         |                      | 22,927 - 241,000               | 22,927 - 241,000   |
| UIS (2009)               | Once (11) cuencas                                 |                 |           |         |                      | 37,000 - 296.000               | 37,000 - 296.000   |

A nivel de fuentes de yacimientos no convencionales, **Arthur D'little** (2008) realiza un estudio de volúmenes de hidrocarburos esperados (Tabla 3). Sus estimaciones se

basan en suposiciones de aprovechamiento comercial de los yacimientos de carbón inventariados a la fecha, y de continuidad regional de otros recursos hidrocarburíferos.

**Tabla 3.** Volúmenes esperados de hidrocarburos no convencionales (Arthur D'little, 2008).

| PRODUCTO                                 | VOLUMEN      | TIPO               |
|--|--------------|--------------------|
| Gas asociado a Carbón (CBM)              | 7.5 TPC      | Gas recuperable    |
| Arenas bituminosas (Tar sands)           | 20 – 40 GBPE | Aceite recuperable |
| Gas asociado a esquistos (Gas shales)    | 32 TPC       | Gas recuperable    |
| Aceite asociado a esquistos (Oil shales) | 14 GBPE      | Aceite recuperable |
| Gas comprimido (Tight gas)               | 1.2 TPC      | Gas in place       |
| Gas hidratado (Gas hydrate)              | 400 TPC      | Gas in place       |

### Metodología

Los volúmenes de hidrocarburos contenidos en reservorios pueden ser estimados mediante la formulación del OOIP (*Original Oil in Place*) que tiene en cuenta algunas características de los yacimientos tales como la porosidad ( $\phi$ ), la saturación de agua ( $S_w$ ), el factor de volumen de la formación ( $B_{oi}$ ) y el volumen total involucrado (Hartmann y Beamont, 1999). En general, la estimación del volumen de hidrocarburos *in situ* antes de la perforación de un pozo es un problema asociado a la predicción efectiva de los anteriores parámetros a partir de datos de formaciones cercanas, yacimientos análogos, o a partir de ejercicios estocásticos. En todos los casos el volumen OOIP se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$OOIP = \frac{7758 * A * h * \phi * (1 - S_w)}{B_{oi}} \quad (1)$$

Donde:

- 7758 = factor de conversión de acres-pie a barriles
- A = área del reservorio en acres
- h = espesor de la formación que contiene el reservorio en pies
- $\phi$  = porosidad (decimal, no porcentaje)
- $S_w$  = saturación de agua (decimal, no porcentaje)
- $B_{oi}$  = factor del volumen de formación

En este trabajo se ha realizado una simulación por el método de Monte Carlo para la estimación del recurso hidrocarburífero en cada cuenca sedimentaria de Colombia. Para el efecto se ha utilizado la fórmula (1) y se han asumido A, h,  $\phi$ ,  $S_w$  y  $B_{oi}$  como variables aleatorias bajo las siguientes hipótesis:

1. Cada cuenca sedimentaria presenta una fracción de área que podría reflejar todo su potencial hidrocarburífero. Dicha área puede ser proyectada a partir de la razón del total del área de producción con respecto al área total de una cuenca. Para el caso de Colombia se han evaluado todas cuencas que tienen

campos en producción y se ha contrastado los resultados con la producción máxima por hectárea para establecer la madurez de la cuenca. La Figura 3 ilustra la relación de áreas para las nueve (9) cuencas que presentan explotación a la fecha. Podemos observar que los porcentajes más altos corresponden a cuencas más maduras y su distribución evidencia como las cuencas más pequeñas han sido mejor exploradas.

La información disponible permitió identificar las cuencas que han ofrecido mayor cantidad de hidrocarburos por unidad de área. La Figura 4 permite valorar la razón de producción en MBPE por hectáreas para seis (6) cuencas. Las cuencas más prolíferas han producido un (1) MBPE por 10 hectáreas aproximadamente (VSM). En contraste, la cuenca Caguán – Putumayo ha llegado a producir la misma cantidad de hidrocarburos por cada 42 hectáreas.

La eficiencia de cada cuenca nos permite evaluar la tendencia general de área de producción por cuenca. La Figura 5 ilustra cómo una tendencia asintótica hacia el 6% del área total por cuenca puede ser el límite superior comercial con el que se podría evaluar el potencial hidrocarburífero. Con este valor se estimará el área teórica máxima de producción por cuenca.

2. Los reportes de producción disponibles en el Ministerio de Minas y Energía de Colombia para las diversas cuencas presentan datos de h,  $\phi$ ,  $S_w$  y  $B_{oi}$  con alta variabilidad e incertidumbre. Para el caso de h, se ha observado valores que oscilan entre 10 y 825 pies. No obstante, la moda del nivel productor para la mayoría de hallazgos recientes se encuentra alrededor de 30 pies. Para simplificar el problema es posible, entonces, utilizar una función triangular que oscile entre 0 y el máximo espesor hallado en la cuenca o en cuencas análogas, y como dato más probable utilizar 30 pies.
3. Respecto a  $\phi$ , se ha podido determinar un valor medio de 16% con una desviación estándar del 5% para todas las cuencas. Se han asimilado estos parámetros

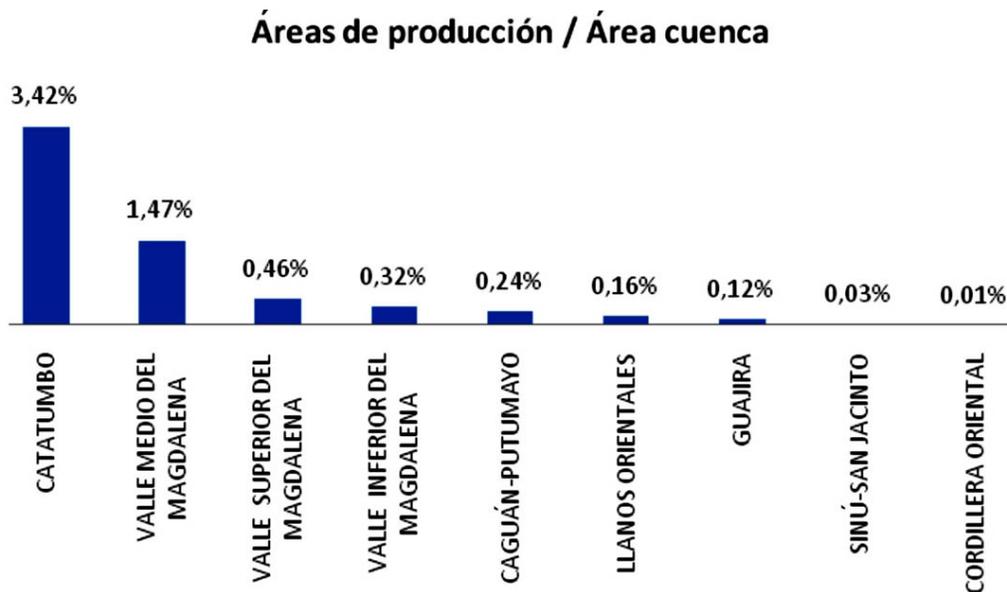


Figura 3. Relación del Área total en Producción con respecto al Área Total de la cuenca (RAPAT) para las nueve (9) cuencas sedimentarias en Colombia que presenta producción de hidrocarburos.

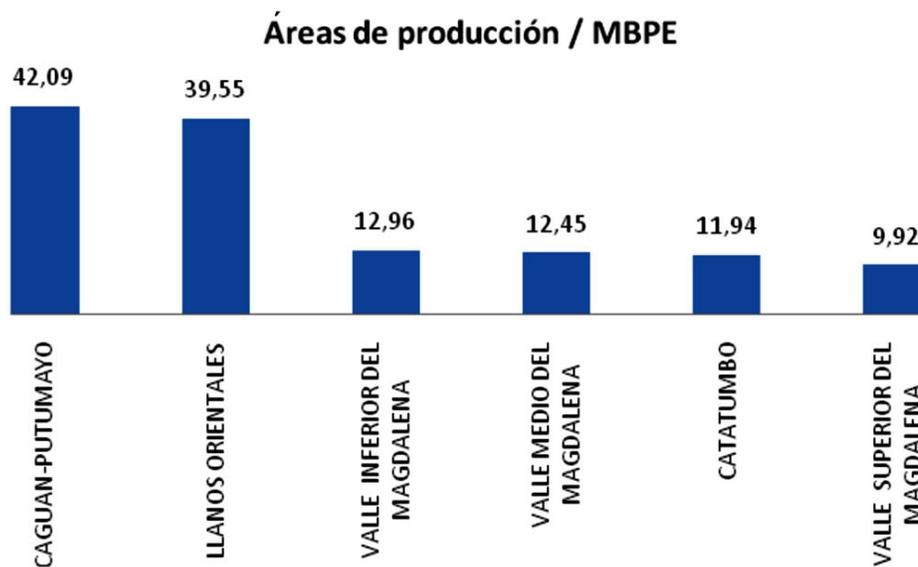


Figura 4. Relación de áreas en producción con respecto a la producción total para seis (6) cuencas sedimentarias de Colombia. Las cuencas con los valores más bajos representan las cuencas más maduras.

a una distribución normal con topes mínimos y máximos según los valores extremos hallados en toda Colombia (0 – 42%).

- La alta variación de los factores  $S_w$  y  $B_{oi}$  en todas las cuencas ha permitido considerar distribuciones uniformes con límites asociados a los valores mínimos y

máximos reportados en toda Colombia ( $S_w$  entre 5 – 95%;  $B_{oi}$  entre 1,06 – 1,51)

- Los diferentes objetivos exploratorios en profundidad, *e.g.* el “play” paleozoico de la Llanos Orientales, son tenidos en cuenta dentro de la misma área contabilizada.

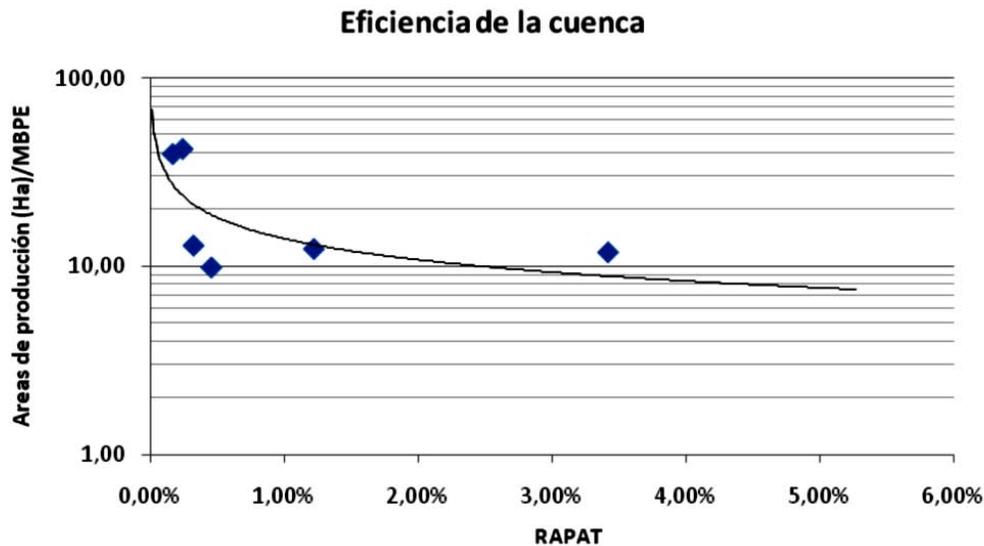


Figura 5. Aproximación asintótica para deducir la madurez y eficiencia de una cuenca sedimentaria basada en áreas de producción con respecto al área total de la cuenca.

6. No se considera el recurso no convencional. Así mismo, la relación genética de cuencas como Amagá y Cauca-Patía, sugieren igual probabilidad de hallar recursos convencionales.

Las tablas 4 y 5 sintetizan los parámetros de todas las cuencas usados en la simulación. En los casos donde existió deficiencia de datos se utilizó información de cuencas análogas o se estableció un promedio estimado de todas las cuencas con datos. Los potenciales hallados son expresados en términos de valor promedio y percentiles  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  y  $P_{90}$ .

#### Cuencas sedimentarias de Colombia: algunos rasgos y potencial hidrocarburífero

A continuación se describen las cuencas sedimentarias de Colombia en términos de los límites propuestos por la ANH (2007), algunos rasgos relevantes sobre el sistema petrolífero (Tabla 4), y los resultados de la estimación probabilística del OOIP basada en el método de Monte Carlo (Tabla 5). Debido a la ausencia de información básica, se exceptúan de la estimación del potencial las cuencas Colombia profundas, tanto en el Mar Caribe como en el Océano Pacífico (Figura 1).

##### Cuenca de Amagá

Esta cuenca se ubica en la parte suroeste del Departamento de Antioquia y el límite superior del Departamento de Caldas. Se encuentra limitada al Este con la Cordillera Central y al Oeste con la Cordillera Occidental y el Sistema de Fallas de Romeral.

La cuenca de Amagá contiene depósitos fluviales con gruesos depósitos de carbón enterrados por tobas volcánicas y flujos de lava. Estos depósitos de carbón pueden contener importantes volúmenes de gas asociado al carbón. El sistema petrolífero de esta cuenca aún no se ha comprobado, pero no se descarta su efectividad por su relación genética con la cuenca Cauca-Patía y algunos elementos análogos a la Cuenca Progreso en Ecuador en su sector oriental.

La simulación por Monte Carlo (Figura 6) sugiere un potencial promedio de 2110.7MBPE. El potencial para los percentiles 90, 50 y 10 se sintetizan en la Tabla 5.

##### Cuenca Caguán-Putumayo

Esta cuenca limita al Noroeste con el sistema de fallas de piedemonte de la cordillera Oriental, al Este con un alto estructural que incluye la Serranía de Chiribiquete. Al Sur con Ecuador y Perú, y al Noreste con la Sierra de la Macarena.

La cuenca de Caguán – Putumayo es la extensión de la cuenca de Marañón en Perú, que ocupa un área de 35.800 km<sup>2</sup> y de la que **PeruPetro** (2003) estima reservas totales probadas, probables y posibles a diciembre 31 de 2001 en 190, 100,5 y 711,5 MBPE, respectivamente. Las reservas probables y posibles de gas fueron estimadas en 39,6 y 56,5 GPC respectivamente. En esta cuenca se presentan grandes trampas y es posible la presencia de crudo pesado.

**Tabla 4.** Algunos rasgos generales sobre el sistema petrolífero de las cuencas sedimentarias de Colombia.

| Cuenca          | Roca fuente  | Migración  | Roca reservorio  | Sello  | Trampa   | Nota   |
|-----------------|--|--|--|--|--|--|
| Amagá           |  |  |  |  |  | La cuenca Cauca - Patía podría extender algunos conceptos genéticos y exploratorios. Analogía con cuencas Talara (Perú) y Progreso (Ecuador) |
| Caguán-Putumayo | Formaciones Caballos y Villeta   | Probablemente la migración es de oeste a este a lo largo de las areniscas de la Fm. Caballos y Villeta. Migración vertical a lo largo de fracturas y zonas de falla. Expulsión de hidrocarburos comenzó en el Mioceno tardío poco después de la formación de las mayores estructuras | Fm. Caballos, Villeta y Pepino   | Formaciones Villeta, Rumiyaco y Orteguaza  | Trampas estructurales asociadas con cabalgamiento y subcabalgamiento en el oeste de la cuenca y levantamientos en el antepaís. Pinchamientos y carbonatos  |  |
| Catatumbo       | Rocas pelíticas cretácicas (Formaciones La Luna, Capacho, Tibú, Barco, Catatumbo y Mercedes) | Migración lateral a lo largo de capas de arenas. Migración vertical a través de fracturas  | Areniscas paleogenas. Rocas cretácicas de aguas superficiales (Grupo Uribante, Formaciones Capacho y La Luna). Areniscas deltaicas de edad Paleogena (formaciones Catatumbo, Barco, Mirador y Carbonera). Adicionalmente, rocas de basamento fracturado. | Formaciones León, Los cuervos, Mito-Juan y Colón   | Anticlinales fallados, fallas normales con inversión parcial, estructuras de subcabalgamiento, estructuras asociadas a sistemas de inversión. Yacimientos asociados a porosidad secundaria desarrollada por fracturas. |  |
| Cauca-Patía     | Formaciones Chimborazo y Nogales. Formación Chapungo es una roca fuente potencial            | Migración a lo largo de capas de arenas del Paleogeno y relacionada a fracturas en zonas de fallas. Migración comienza en el Mioceno tardío y continúa hoy (evidencia en rezumaderos)  | Formación Chimborazo   | Formaciones Guachinte, Ferreira y Chimborazo. Sin embargo el sello es el mayor factor de riesgo en esta cuenca | Cabalgamientos de alto ángulo en anticlines. Trampas estructurales, pinchamientos estratigráficos y onlaps son trampas potenciales.  | Analogía con la cuenca Talara (Perú) en su sector oriental   |

Continuación Tabla 4.

| Cuenca             | Roca fuente  | Migración   | Roca reservorio   | Sello  | Trampa   | Nota   |
|--------------------|--|---|---|--|--|--|
| Cesar-Ranchería    | Formaciones Molino, La Luna, Lagunitas y Aguas Blancas.  | Migración asociada a eventos transpresionales y en sistemas de fracturas asociados a zonas de fallas.   | Formaciones Lagunitas y Aguas Blancas   | Shales Cretácicos y Cenozoicos   | Estructurales asociadas con cierres de subcabalgamiento en la región del Perijá. Anticlinales en la región central y estructuras en flor asociadas con el sistema de fallas de Oca en el norte del área.                 | La exploración en la cuenca inició con el pozo El Paso-1 perforado por la Tropical Oil Company |
| Chocó              | Formación Iró  | Migración lateral. Migración vertical asociada con los sistemas de fallas.  | Formaciones Iró y La Mojarra. Yacimientos naturalmente fracturados.                                     | Formaciones La Sierra e Itsmína.   | Varios altos estructurales, anticlinales con núcleo de lodo, flancos de diapiros, cabalgamiento de anticlinales, fallas normales, geometrías estratigráficas, rocas carbonatadas y cherts fracturados en zonas de falla. | Analogías con las cuencas Progreso y Talara  |
| Chocó Off shore    | Formación Iró  | Migración lateral. Migración vertical asociada con los sistemas de fallas.  |   |  | Estratigráficas y estructurales  | Analogías con las cuencas Progreso y Talara  |
| Eastern Cordillera | Formación La Luna. Dos secciones condensadas del Albiano Medio y Turoniano, depositadas en ambientes anóxicos son consideradas como las mejores fuentes. | El primer pulso de generación ocurrió en el Cretácico tardío. El segundo pulso ocurrió desde el Mioceno al reciente.  | El reservorio más importante fue depositado durante el Albiano y Cenomaniano y siliciclastos Paleogenos | Shales de la formación Esmeralda, formación Mugrosa, arcillolitas de Socha | Las principales características estructurales son las fallas inversas que involucran basamento como resultado de la inversión de fallas normales pre-existentes, fallas relacionadas a pliegues y estructuras en dúplex. |  |
| Eastern Llanos     | Formaciones Gachetá y Villeta  | Dos pulsos de migración han sido documentados, el primero durante el Eoceno - Oligoceno superior, el segundo comienza en el Mioceno y continua hasta el presente. | Carbonera (C3, C5 y C7) y Mirador   | Carbonera (C2, C8)   | Anticlinales fallados, fallas antitéticas, trampas estratigráficas   |  |

Continuación Tabla 4.

| Cuenca                  | Roca fuente  | Migración  | Roca reservorio  | Sello   | Trampa  | Nota |
|-------------------------|--|--|--|---|---|------|
| Guajira                 | Formaciones Colón, La Luna, Cogollo y Castilletes    | La mayoría de las estructuras fueron formadas durante el Paleogeno tardío y Neogeno temprano. Migración secundaria probablemente ocurrió después de primera fase de estructuración hacia el Neogeno tardío           | Formación Jimol, Uitpa, Macarao, La Luna y Cogollo.  | Formación Castilletes, Uitpa, Siamana, Guaralamay y Cogollo.                                  | Trampas estructurales del neogeno resultado de la deformación generada por las fallas de Cuisa y Oca. Onlaps y truncaciones. Carbonatos.  |      |
| Guajira Off shore       | Formación Castilletes                                | Se favoreció por la configuración estructural con caminos de migración desde fuentes termogénicas en el offshore profundo hacia los yacimientos de Chuchupa, Ballena y Riohacha.                                     | Dos tipos de reservorios han sido documentados en esta área: 1. Carbonatos, 2. reservorios siliciclásticos compuestos por arenas basales paleogenas. | Secuencias de shales de edad Paleogena y Neogena  | Estructurales y estratigráficas. Fallas lítricas normales, carbonatos, pinchamientos y onlaps.  |      |
| Los Cayos               |  |  | Depositos siliciclasticos del Eoceno y limolitas arrecifales del Miocene-Oligocene   | Shales del Oligoceno - Mioceno  | Domos estructurales y fallas normales   |      |
| Lower Magdalena Valley  | Formación Porquero Inferior, Ciénaga de Oro Superior | Se han propuesto 4 rutas de migración 1) Área de Cicuco - Boquete, 2) Área Momposina, 3) Área de Guepaje y 4) Región de Apure. Probablemente la migración se dio a lo largo de redes de fracturas y planos de falla. | Formación Ciénaga de Oro   | Posiblemente shales de las formaciones Porquero Superior, Ciénaga de Oro y Tubará             | Trampas estructurales y estratigráficas   |      |
| Middle Magdalena Valley | Formaciones La Luna y Simiti-Tablazo                 | Migración vertical directa por la inconformidad del Eoceno o a través de fallas y migración lateral a lo largo de arenas del Eoceno  | Formación Lisama, Esmeraldas-La Paz, y Colorado-Mugrosa, la Luna, Umir, Barco.   | Formaciones Esmeraldas, Colorado. Potencialment e los shales de las formaciones Simiti y Umir | 1) Fallas relacionadas a pliegues bajo superficies de cabalgamiento, 2) Estructuras duplex con cierres de falla independientes, 3) Cierres estructurales donde los estratos de los yacimientos buzan contra las fallas, 4) Trampas en el bloque colgante de las fallas sellantes. |      |

Continuación Tabla 4.

| Cuenca                 | Roca fuente       | Migración               | Roca reservorio                                 | Sello                                      | Trampa   | Nota                                     |
|------------------------|-------------------|-------------------------|---|--|--|--|
| Sinú-San Jacinto       | Formación Cansona | A lo largo de fracturas | Areniscas Paleogenas y formación Ciénaga de Oro | Formaciones Floresanto, San Jacinto y Maco | Cierres contra fallas cabalgantes. Trampas estratigráficas |  |
| Sinú Off shore         |                   |                         | Paleogene sandstones                            |  |  |  |
| Upper Magdalena Valley |                   |                         | Caballos, Monserrate, Honda                     |  |  |  |
| Vaupés- Amazonas       |                   |                         |   |  |  | Analogía con la cuenca Solimoes (Brasil) |

Tabla 5. Información general de cuencas y rangos para los parámetros básicos usados en la simulación por Monte Carlo.

| Cuenca                  | Tipo de cuenca   | Campos descubiertos | Pozos | Reservas petróleo descubiertas (MBPE) | Reservas de gas recuperadas (GPC) | Área (Ha)  | Espesor promedio reservorio (pies) | Porosidad (%) | Permeabilidad (mD) | Sw            |
|-------------------------|--|---------------------|-------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------|------------------------------------|---------------|--------------------|---------------|
| Amagá                   |  |                     |       |                                       |                                   | 282.493    |                                    |               |                    |               |
| Caguán-Putumayo         | Antepaís   | 19                  |       | 365                                   | 305                               | 11.030.407 | 50 - 300                           | 10 - 16%      | 50                 | 16 - 35%      |
| Catatumbo               | Antepaís   | 11                  | 39    |                                       |                                   | 771.501    | 30 - 825                           | 0.5 - 14%     | 10                 |               |
| Cauca-Patía             | Asociada a colisión                                    | 5                   |       |                                       |                                   | 1.282.331  |                                    | 3 - 15%       | 100                |               |
| Cesar-Ranchería         | Intramontañosa   |                     | 14    |                                       |                                   | 1.166.868  | 500                                | 5%            |                    |               |
| Chocó                   | Pre-arco?  |                     | 5     |                                       |                                   | 3.858.198  | 250                                | 0 - 42%       |                    |               |
| Chocó Off shore         |  |                     |       |                                       |                                   | 3.777.329  | 250                                | 0 - 42%       |                    |               |
| Colombia                |  |                     |       |                                       |                                   | 25.699.527 |                                    |               |                    |               |
| Colombian Deep Pacific  |  |                     |       |                                       |                                   | 27.242.658 |                                    |               |                    |               |
| Eastern Cordillera      | Grabén invertido / Cinturón plegado                    |                     | 38    | 1.700                                 |                                   | 7.176.620  |                                    | 5 - 10%       | 4-100              | 95%           |
| Eastern Llanos          | Antepaís Cenozoico                                     |                     | 260   | 1.500                                 |                                   | 22.560.327 | 30 - 590                           | 10 - 30%      |                    | 37.3% - 76.9% |
| Guajira                 | Transtensional   |                     | 18    |                                       |                                   | 1.377.892  | 100                                | 3 - 40%       |                    |               |
| Guajira Off shore       |  |                     |       |                                       |                                   | 5.286.085  | 100                                | 3 - 40%       |                    |               |
| Los Cayos               | Transpresional   |                     |       |                                       |                                   | 14.475.501 |                                    | 25 - 10%      |                    |               |
| Lower Magdalena Valley  | Transtensional   | 17                  | 117   |                                       |                                   | 3.801.740  | 300                                | 15%           |                    |               |
| Middle Magdalena Valley | Poli-histórica, apertura de rift / Antepaís fracturado | 41                  | 296   | 1.900                                 | 2,5                               | 3.294.942  | 163 - 500                          | 12 - 25%      |                    |               |
| Sinú-San Jacinto        | Prisma acrecionario                                    |                     | 44    |                                       |                                   | 3.964.459  | 30 - 350                           | 3 - 30%       |                    |               |
| Sinú Off shore          | Prisma acrecionario                                    |                     |       |                                       |                                   | 2.957.648  | 30 - 350                           | 3 - 30%       |                    |               |
| Tumaco                  |  |                     |       |                                       |                                   | 2.373.242  |                                    | 0 - 42%       |                    |               |
| Tumaco Off shore        |  |                     |       |                                       |                                   | 3.455.268  |                                    |               |                    |               |
| Upper Magdalena Valley  | Poli-histórica, apertura de rift / Antepaís fracturado | 36                  | 210   | 631                                   | 123                               | 2.151.284  |                                    | 11 - 25%      |                    |               |
| Urabá                   |  |                     |       |                                       |                                   | 944.895    | 30 - 350                           | 3 - 30%       |                    |               |
| Vaupés- Amazonas        |  |                     |       |                                       |                                   | 15.486.731 |                                    | 2 - 28%       |                    |               |

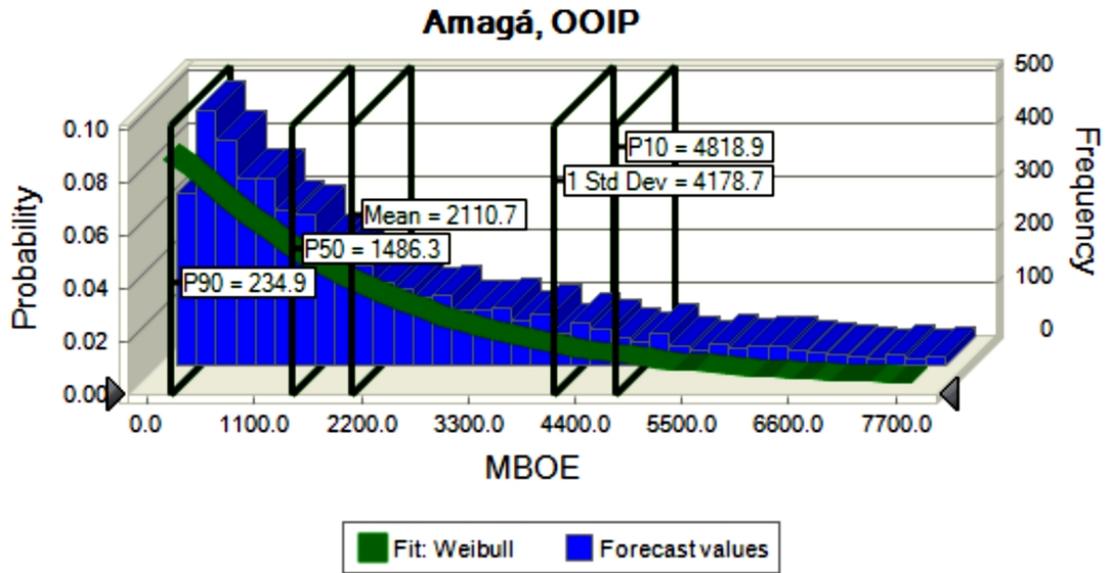


Figura 6. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Amagá.

La cuenca de Caguán – Putumayo cuenta con más de 41 campos y unas reservas 2P de 594 MBPE (IHS, 2008). La mayoría de la producción proviene de la formación Caballos, con objetivos adicionales las areniscas deltaicas de la formación Villeta y los depósitos de la formación Pepino. La roca generadora son los shales y calizas de la formación Villeta (Govea y Aguilar, 1986).

Las estimaciones probabilísticas en este trabajo sugieren un promedio de 82.100,2 MBPE para el área de la cuenca sobre territorio colombiano (Figura 7).

**Cuenca Catatumbo**

La cuenca de Catatumbo limita al Norte y el Este con Venezuela, al Sur con la Cordillera Oriental y al Oeste con

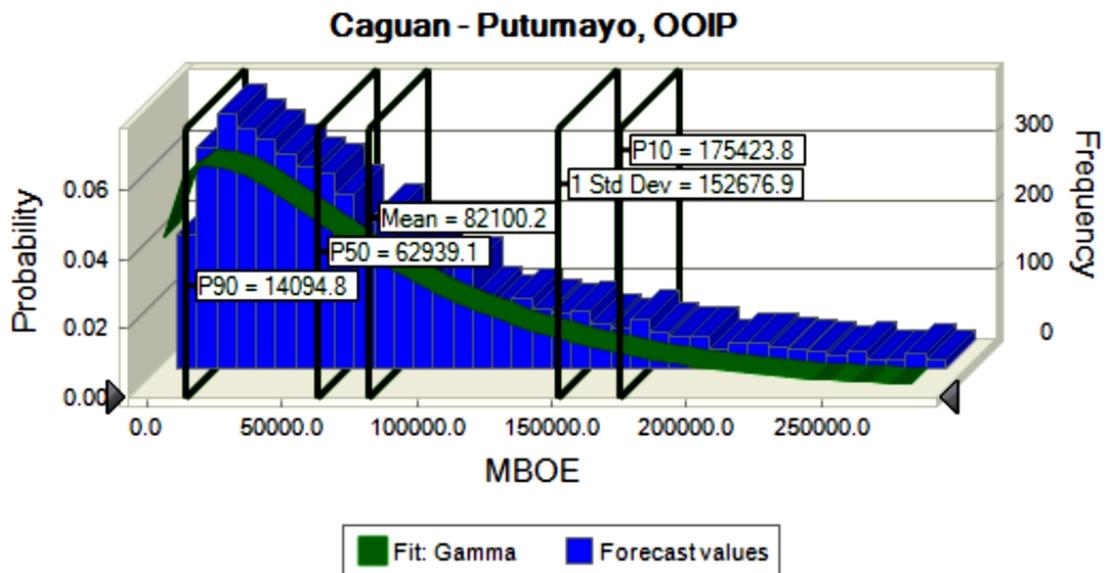


Figura 7. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Caguán - Putumayo.

el Macizo de Santander. Una porción de esta cuenca es la continuación de la provincia de Maracaibo, en Venezuela, que cuenta con campos gigantes.

Esta cuenca presenta al menos trece (13) campos descubiertos y una producción de crudo (22-42° API) desde 1933 (Govea y Aguilar, 1986). Sus reservas 2P llegan a los 636 MBPE (IHS, 2008), pero parece contener un importante recurso asociado a las fracturas del basamento y a las unidades cretácicas. Adicionalmente, su baja migración vertical podría coadyuvar a un alto potencial en profundidad. Las simulaciones indican un potencial promedio de 14.435,8 MBPE (Figura 8).

#### Cuenca Cauca-Patía

La cuenca de Cauca – Patía limita al Oeste con el sistema de fallas de Cauca, Cordillera Occidental. Al Este con el sistema de fallas de Romeral, Cordillera Central, y al Norte y Sur con rocas ígneas básicas del Cretácico tardío.

Es una cuenca de tipo convergente, producto de la interacción entre la placa oceánica y la placa continental y adyacente a la zona de subducción. Aunque tiene una densidad de exploración escasa, presenta rezumaderos en diferentes sitios de la cuenca que prueban el sistema petrolífero (Govea y Aguilar, 1986).

La distribución de la roca fuente no es bien conocida, y la migración y tiempos se consideran complejos, sin embargo su potencial hidrocarburífero y características geológicas son similares al sector oriental de la cuenca de Talara (Perú).

Las estimaciones de OOIP indican un promedio de 9.031,5 MBPE (Figura 9).

#### Cuenca Cesar-Ranchería

Esta cuenca limita al Noreste con la falla de Oca, al Noroeste con las rocas precretácicas de la Sierra Nevada de Santa Marta, el Este y Sureste con rocas precretácicas de la serranía de Perijá y con Venezuela, y al suroeste con el trazo de la falla de Bucaramanga.

Es una cuenca continental prolongación de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, desplazada hacia el norte por la falla de Santa Marta y separada por la Cuenca del Catatumbo (Maracaibo) cuando se levantó la serranía de Perijá (Govea y Aguilar, 1986). Cuenta con 4 campos y unas reservas 2P de 33 MBPE (IHS, 2008).

Se considera una cuenca con un buen sistema petrolífero, aún cuando la secuencia estratigráfica es delgada en algunos sectores. Esta cuenca tiene potenciales recursos de gas convencional y asociado al carbón. Las simulaciones de Monte Carlo realizadas en este trabajo indican un potencial promedio de 13.903,5 MBPE (Figura 10).

#### Cuenca Chocó

La cuenca de Chocó limita al Norte y Noroeste con Panamá, al Sur con la zona de falla de Garrapatas, al Noroeste con la Serranía de Baudó, al Suroeste con la línea de Costa Pacífica y al Este con el Batolito de Mande, Cordillera Occidental y parcialmente con la falla de Murindó.

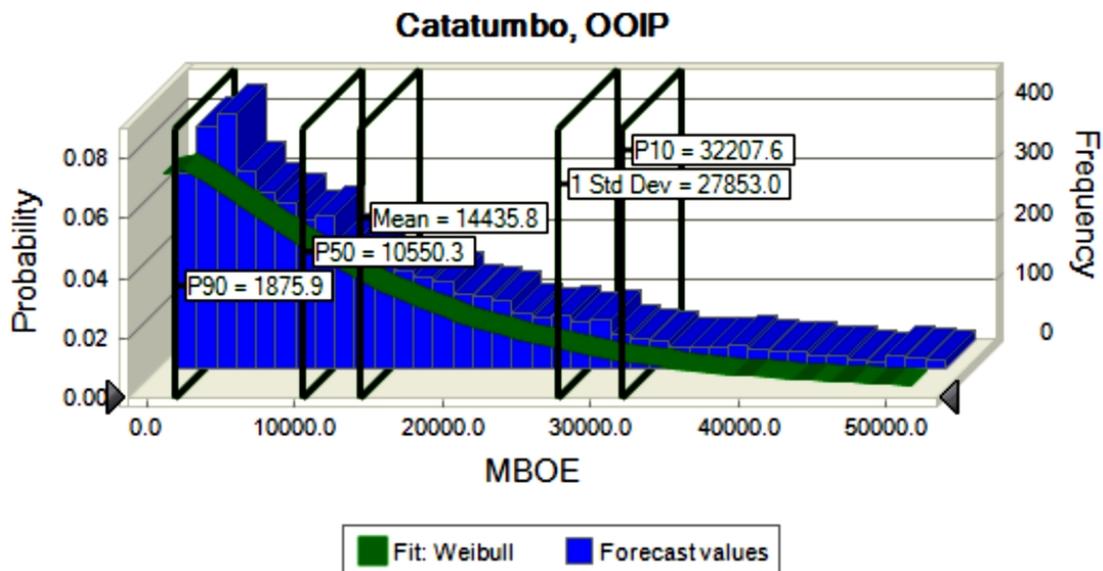


Figura 8. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Catatumbo.

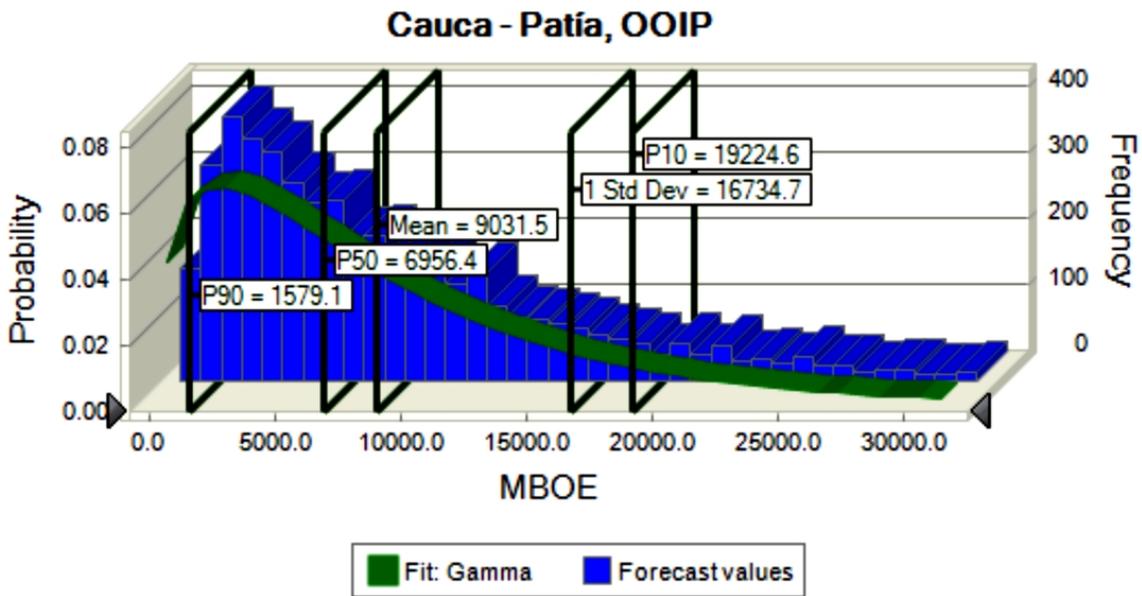


Figura 9. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Cauca-Patía.

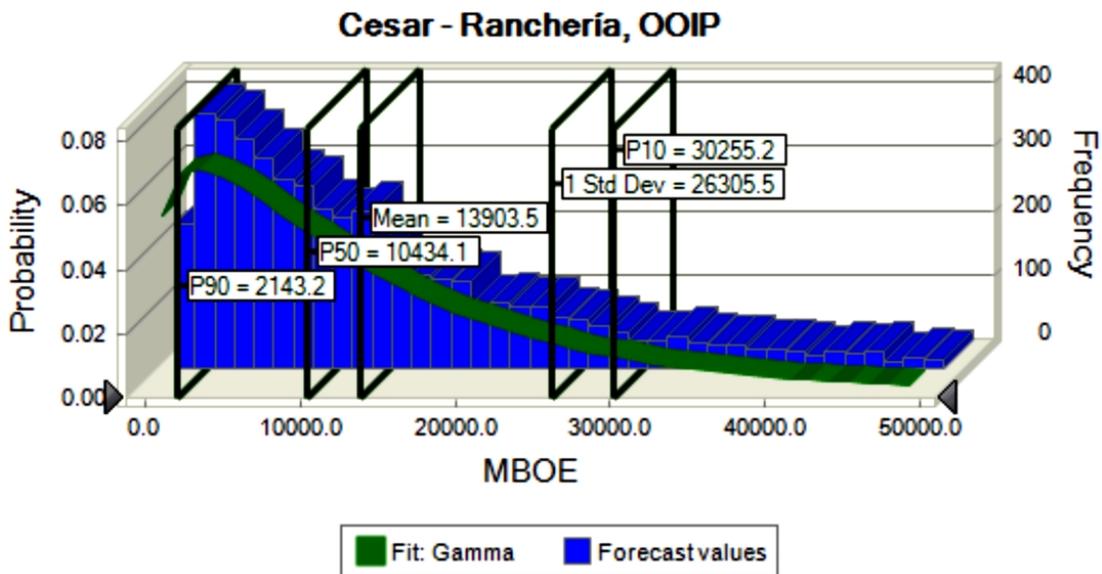


Figura 10. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Cesar-Ranchería.

Esta cuenca se ha interpretado como el producto de extensión en un ambiente de arco. Presenta secciones gruesas, numerosas estructuras compresivas y rezumaderos de petróleo que confirman la presencia de un sistema petrolífero. Presenta bajo flujo de calor y aún no es conocida la distribución y calidad de la roca fuente. Sin embargo, por su naturaleza y posición geográfica es po-

sible extender conceptos exploratorios de las cuencas de Talara (Perú) y Progreso (Ecuador).

Son numerosas las manifestaciones de aceite y gas en superficie. El primer pozo exploratorio de la cuenca fue perforado en 1953 (Buchadó – 1) por Richmond Petroleum a una profundidad de 15.539 pies, sin producción comer-

cial (Govea y Aguilar, 1986). Las estimaciones probabilísticas indican un potencial promedio de 26.974,9 MBPE (Figura 11, Tabla 5).

**Cuenca Chocó Offshore**

Esta cuenca limita al Norte - Noreste con Panamá, al Sur con la zona de falla de Garrapatas, al Occidente con la zona de Subducción y al Este con la línea de costa Pacífica.

Aunque el pozo Tambora-1 mostró shows de gas y la información sísmica permite comprobar la presencia de trampas estructurales y estratigráficas, será necesario evaluar su roca fuente y tiempos. Igualmente las cuencas de Talara y Progreso constituyen modelos análogos para describir su sistema petrolífero. Las estimaciones probabilísticas realizadas indican un potencial promedio de 17.781,2 MBPE (Figura 12, Tabla 5).

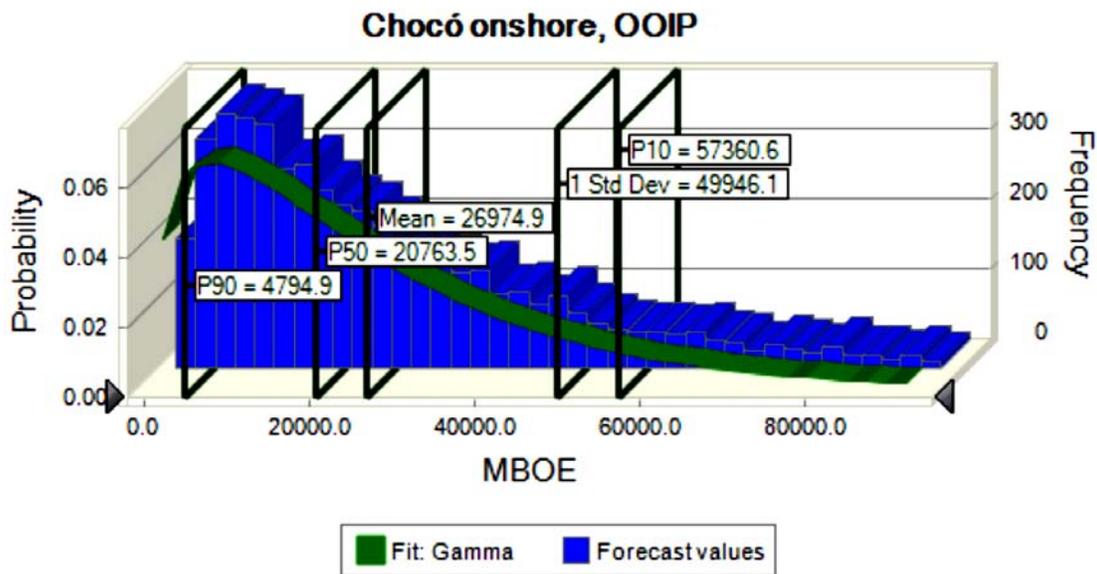


Figura 11. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Chocó.

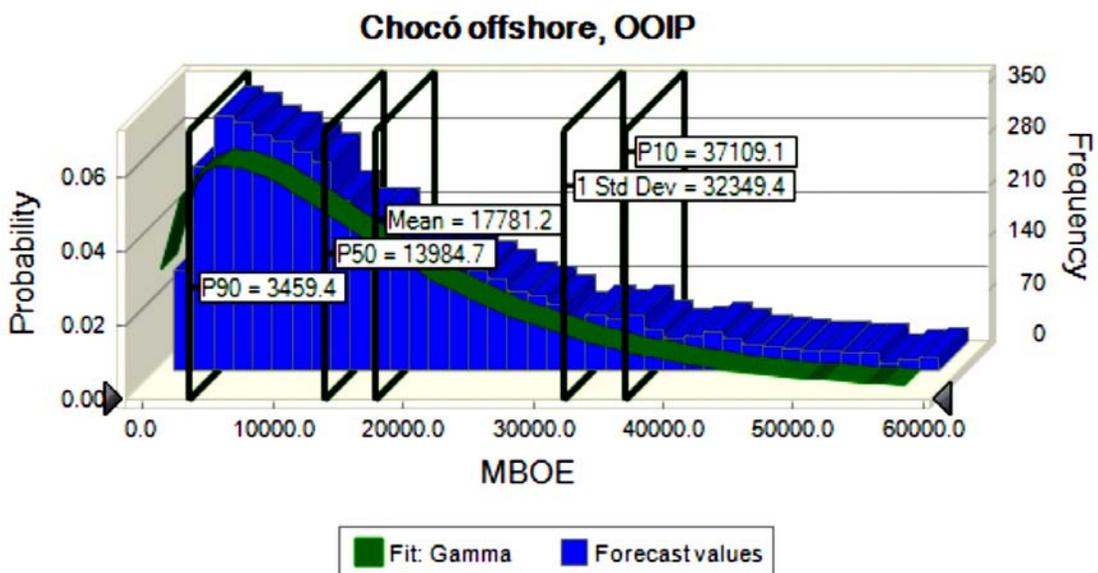


Figura 12. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca Chocó offshore.

### Cuenca Cordillera Oriental

Al norte limita con el macizo de Santander, al Sureste con el sistema de fallas de Algeciras – Garzón, al Oeste el sistema de fallas de Bituima – La Salina. Al Este con el sistema de cabalgamiento de la Cordillera Oriental.

Cuenta con buena producción en el área de Piedemonte y con grandes estructuras compresivas. Sin embargo fuera del área de piedemonte algunos elementos no están bien caracterizados. Cuenta con 13 campos y unas reservas 2P de 3,495 MBPE (IHS, 2008). En el área de la Sabana de Bogotá son conocidas varias manifestaciones superficiales de aceite (Govea y Aguilar, 1986).

Las simulaciones de Monte Carlo realizadas en este trabajo indican un potencial promedio de 49.893,2 MBPE (Figura 13, Tabla 5).

### Cuenca Llanos Orientales

La cuenca de los Llanos Orientales limita al Norte con Venezuela, al sur con la Serranía de la Macarena, el Arco de Vaupés y las rocas metamórficas precámbricas, al oeste con el sistema de cabalgamiento de la cordillera oriental y al oriente con las rocas precámbricas del escudo Guayanes.

Esta cuenca es una de las más productivas del país. El sistema petrolífero es conocido, la ruta de migración es larga especialmente para la zona central y oriental de la cuenca por lo que se tiene mayor producción hacia el Oc-

cidente. El sello disminuye hacia el Este y es común la biodegradación. Las trampas son combinadas entre estratigráficas y estructurales. Cuenta con 119 campos y unas reservas 2P de 3,050 MBPE (IHS, 2008).

Las estimaciones probabilísticas indican un potencial promedio de 315.667,3 MBPE (Figura 14).

### Cuenca Guajira

El límite Norte, Noroeste y Noreste de la cuenca Guajira es la línea de Costa Caribe. Al sur esta cuenca limita con la falla de Oca y al Sureste con Venezuela.

La cuenca de la Guajira ha sido dividida por el trazo de la falla de Cuiza en las subcuencas de alta y baja Guajira. Ésta tiene importantes depósitos de gas, buena infraestructura, baja topografía y numerosos rezumaderos. Cuenta con tres (3) campos, unas reservas 2P de 21 MBPE y un YTF de 185 MBPE (IHS, 2008). Las simulaciones realizadas en este trabajo indican un potencial promedio de 4.042,8 MBPE (Figura 15).

### Cuenca Guajira Offshore

El límite Norte y Noroeste de la cuenca de la Guajira offshore es el frente de deformación del cinturón del Sur del Caribe, originada por la interacción entre la placa de América del Sur y la placa del Caribe. Al Suroeste limita con la falla de Oca, al Sureste con la línea de costa continental de la Guajira y al Oriente con Venezuela.

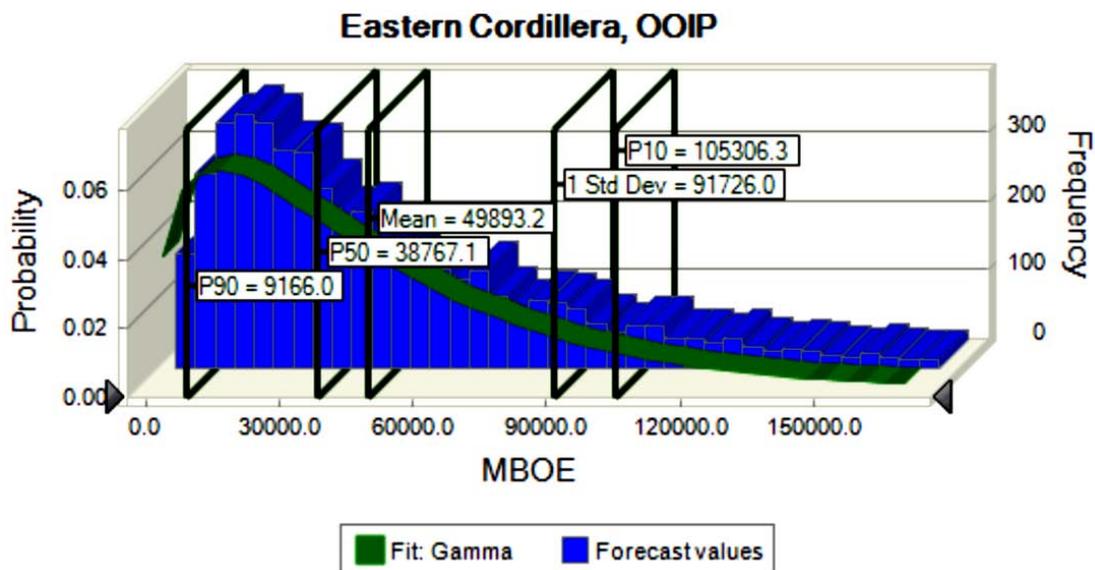


Figura 13. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca Cordillera Oriental.

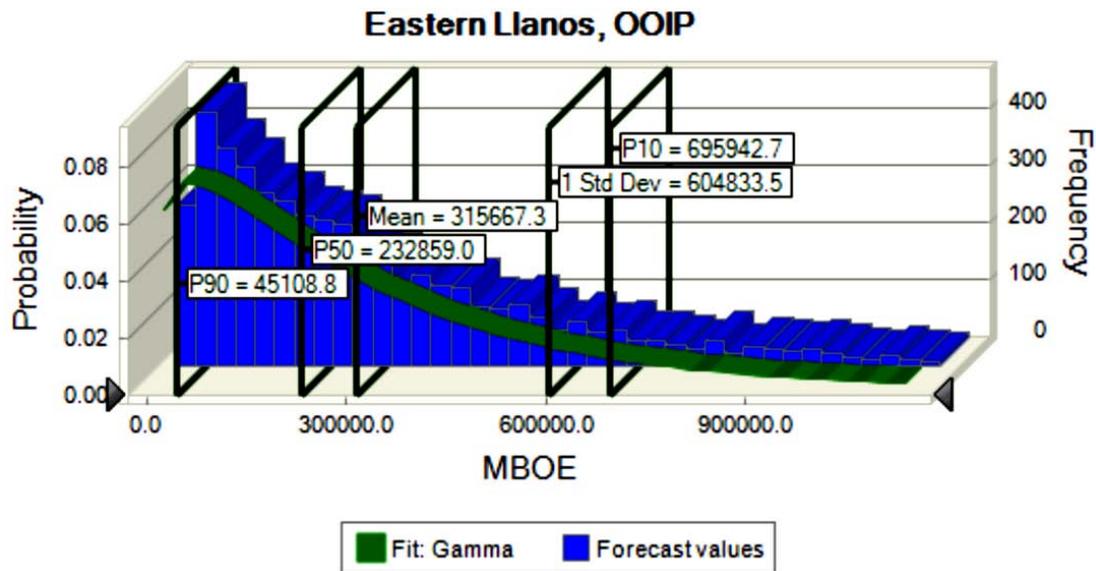


Figura 14. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Llanos Orientales.

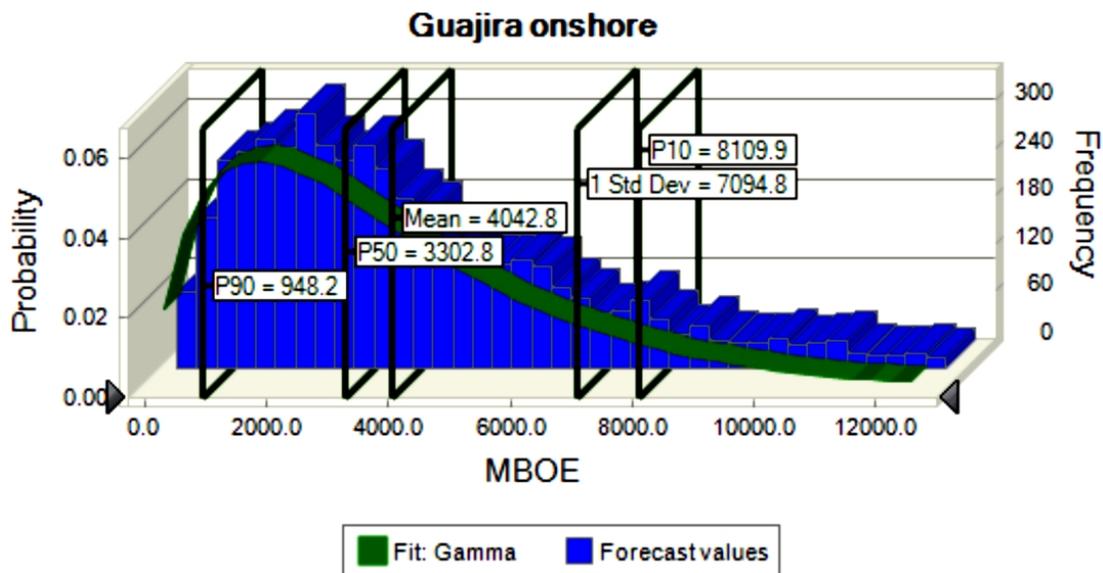


Figura 15. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de la Guajira.

Esta cuenca se caracteriza por abundantes cierres compresionales, presencia de gas y amplio sello, aunque este puede no ser efectivo en algunas partes por presencia de fallas y diapiros. El sistema petrolífero no se ha caracterizado y la calidad y presencia de la roca reservorio y la roca fuente son poco conocidas. La cuenca Guajira Marino cuenta con tres (3) campos, unas reservas 2P de 256 MBPE, y un YTF de 1.929 MBPE (IHS, 2008).

Las estimaciones probabilísticas de Monte Carlo realizadas en este trabajo indican un potencial promedio de 15.354,4 MBPE (Figura 16).

#### Cuenca Los Cayos

La cuenca de Los Cayos es una cuenca oceánica en la región del mar Caribe y que limita al Norte, Este y Oeste

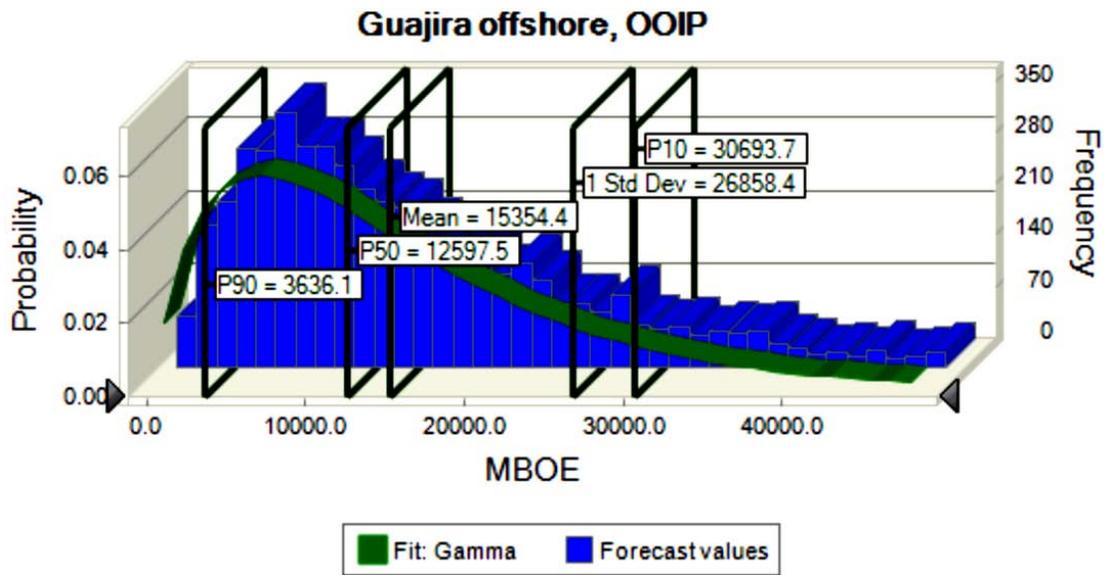


Figura 16. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Guajira offshore.

con Nicaragua, Honduras y Jamaica, al Sur y Sureste con el Escarpe de Hess.

Esta cuenca cuenta con gruesas secciones sedimentarias; pero la roca fuente y el reservorio no han sido caracterizados. Las simulaciones probabilísticas realizadas indican un potencial promedio de 98.318,9 MBPE (Figura 17).

**Cuenca Valle Inferior del Magdalena**

La cuenca del Valle Inferior del Magdalena limita al Norte y al Oeste con el sistema de fallas de Romeral, al Sur y Sureste con la Cordillera Central y las rocas precretácicas de la Serranía de San Lucas y la Cordillera Central. Al Este con el sistema de fallas de Bucaramanga – Santa Marta.

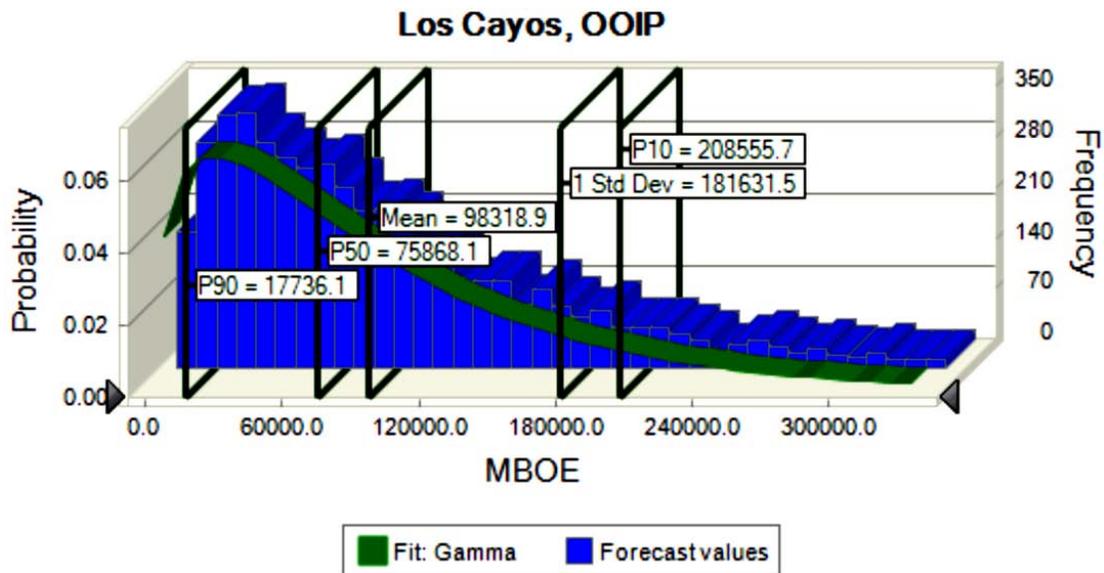


Figura 17. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Los Cayos.

Los sedimentos del Mio-Oligoceno presentan buena riqueza orgánica y presencia de kerogenos generadores de gas y petróleo líquido (Govea y Aguilar, 1986). Esta cuenca tiene buenos reservorios de arenisca y carbonatos, y reservas probadas de gas.

Cuenta con 23 campos y unas reservas 2P de 1.032 MBPE (IHS, 2008). Las simulaciones probabilísticas realizadas indican un potencial promedio de 28.592,5 MBPE (Figura 18).

#### Cuenca Valle Medio del Magdalena

Esta cuenca limita al sureste con el sistema de Fallas de Bituima y La Salina, al Norte con el sistema de fallas del Espíritu Santo, al Oeste con el onlap de sedimentos Neógenos sobre la Serranía de San Lucas y el basamento de la Cordillera Central. Al sur con el cinturón plegado de Girardot y al Noreste con el sistema de fallas de Bucaramanga – Santa Marta.

Es una cuenca madura, con alta producción desde el año 1.918 y una amplia gama de crudos (13-45° API). Cuenta con 99 campos y unas reservas 2P de 3.337 MBPE (IHS, 2008).

Los resultados de la sísmica reciente (Regional Transandina, ANH-2006) sugieren importantes yacimientos en profundidad (rocas pre-paleogenas fracturadas y trampas estructurales hacia las estribaciones de la Serranía de San Lucas). Las estimaciones de Monte Carlo realizadas en este trabajo indican un potencial promedio de 24.602,8 MBPE (Figura 19).

#### Cuenca Sinú-San Jacinto

La cuenca de Sinú – San Jacinto se caracteriza por tener una alta deformación y unos cierres complejos y apretados. Limita al Norte–Noroeste con la Costa Caribe, al oeste el sistema de fallas de Uramita, al sur con la Cordillera Occidental y al Este el sistema de fallas de Romeral.

Algunas zonas al Este de la cuenca no han sido exploradas. En esta cuenca se presentan abundantes diapiros y rezumaderos. El tamaño y la localización de la cocina se desconoce. Cuenta con nueve (9) campos, unas reservas 2P de 12 MBPE, y un YTF de 1.011 MBPE (IHS, 2008).

Las simulaciones probabilísticas realizadas indican un potencial promedio de 33.821,0 MBPE (Figura 20).

#### Cuenca Sinú Offshore

Esta cuenca se encuentra bajo el mar Caribe y limita al noreste con la falla de Oca, al sureste con la línea de costa, al noroeste con el frente de deformación del cinturón deformado del sur del Caribe y al sur con el sistema de falla de Uramita.

La caracteriza una buena calidad de sello y presencia de trampas estructurales; sin embargo la calidad y distribución del reservorio no está bien caracterizada. Las estimaciones probabilísticas de Monte Carlo realizadas en este trabajo indican un potencial promedio de 24.835,4 MBPE (Figura 21, Tabla 5).

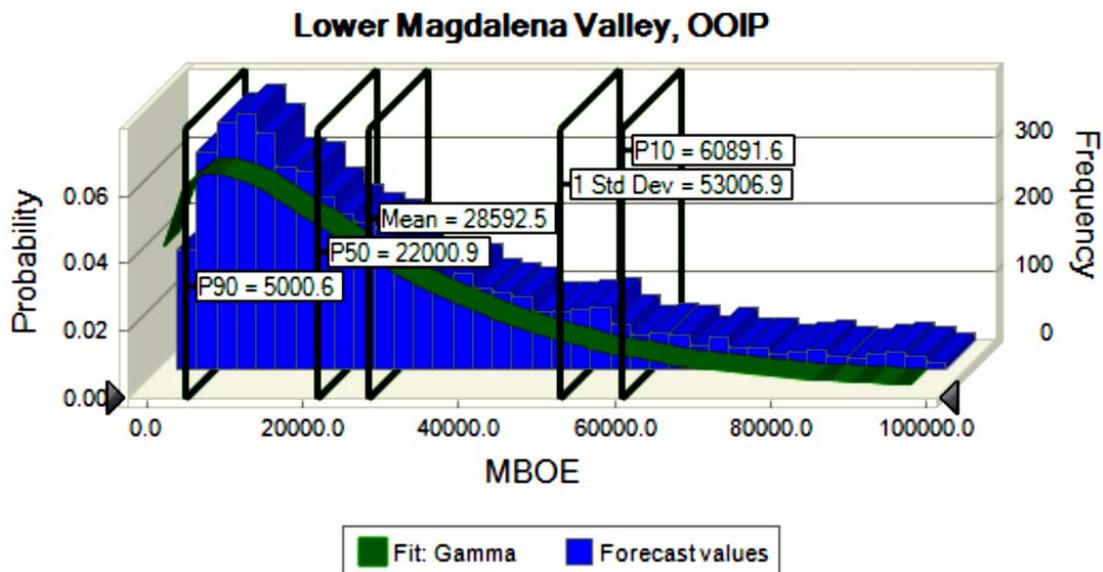


Figura 18. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca del Valle Inferior del Magdalena.

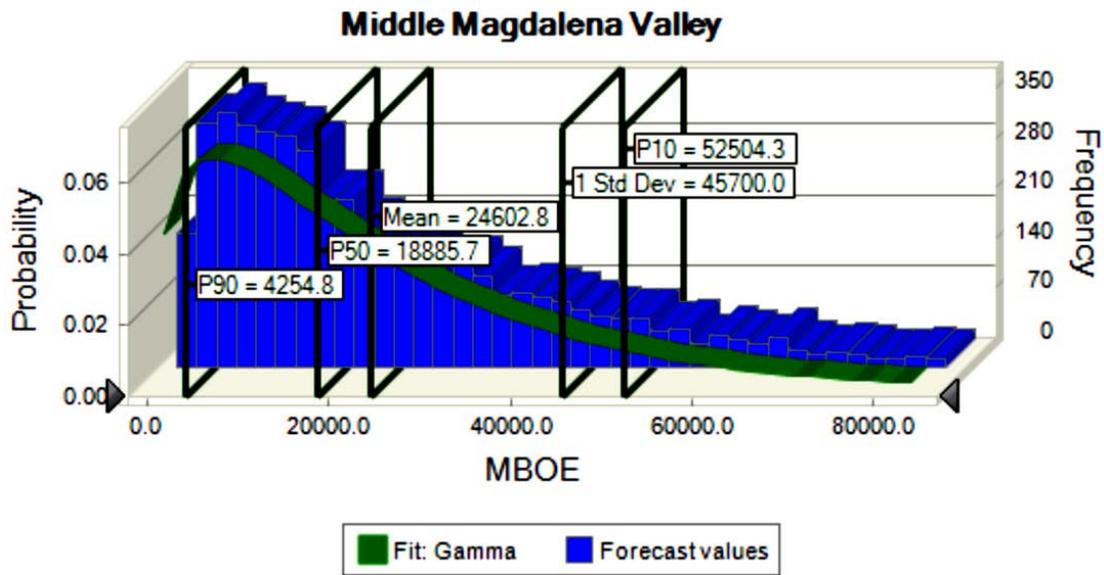


Figura 19. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Valle Medio del Magdalena.

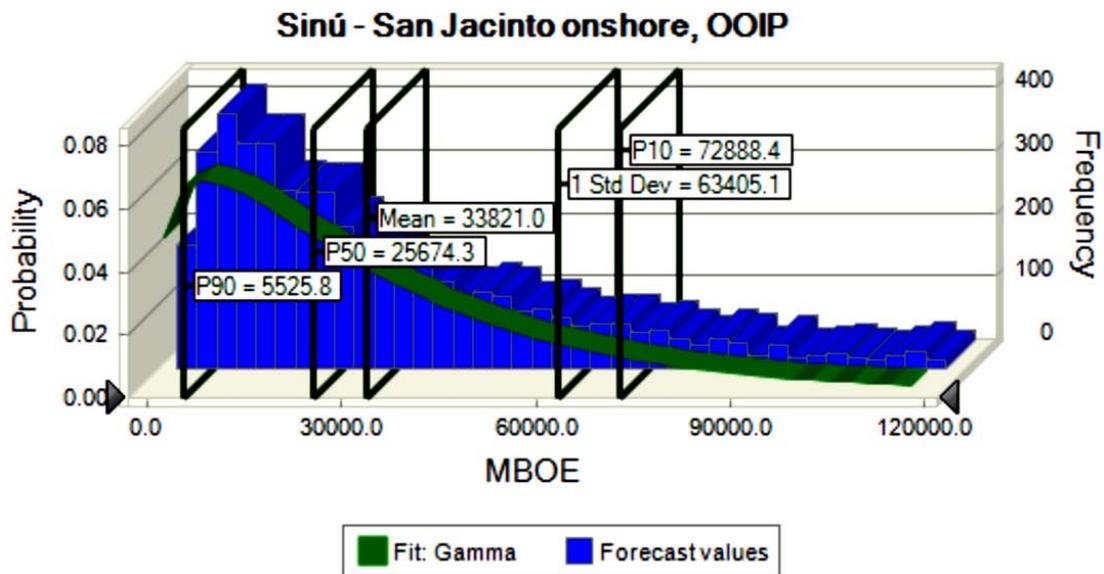


Figura 20. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Sinú-San Jacinto.

**Cuenca Tumaco**

La cuenca de Tumaco limita al norte con el sistema de fallas de Garrapata, al sur con Ecuador, al Este con las rocas volcánicas de la Cordillera Occidental, y al oeste con la línea de costa del Océano Pacífico.

Esta cuenca, al igual que la cuenca Tumaco offshore, se caracteriza por tener una sección gruesa, un buen sello, presencia de rezumaderos, numerosas estructuras com-

sivas y bajo flujo de calor en algunas áreas. Las simulaciones de Monte Carlo realizadas indican un potencial promedio de 16.450,9 MBPE (Figura 22, Tabla 5).

**Cuenca Tumaco Offshore**

La Cuenca Tumaco Marino se encuentra en la región marina suroeste de Colombia, bajo el océano pacífico. Limita al Norte con el sistema de fallas de Garrapata, al Sur con Ecuador, al Este con la línea de costa del Océano

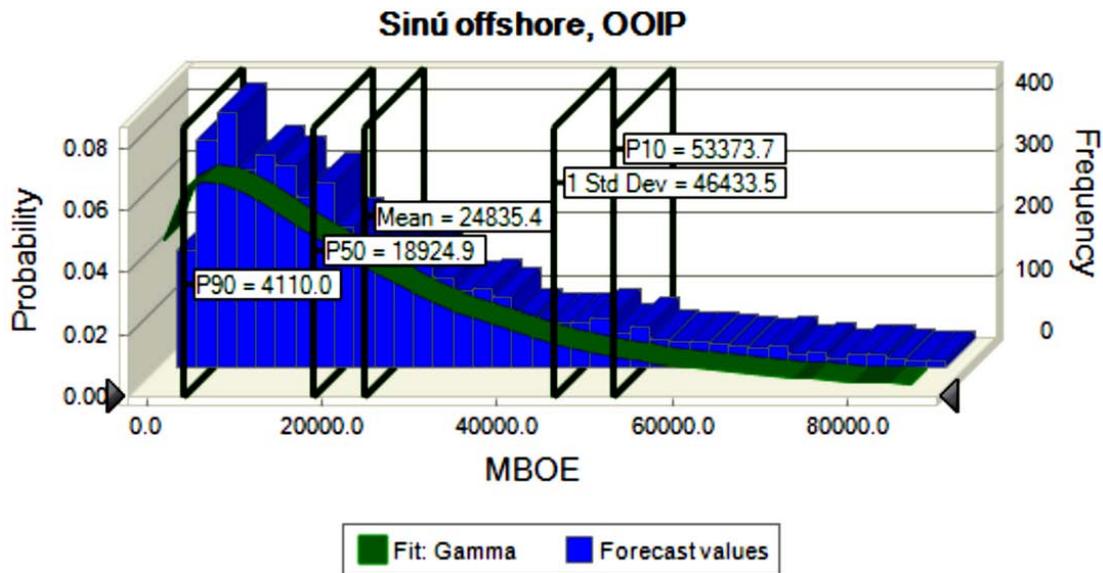


Figura 21. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca Sinu offshore.

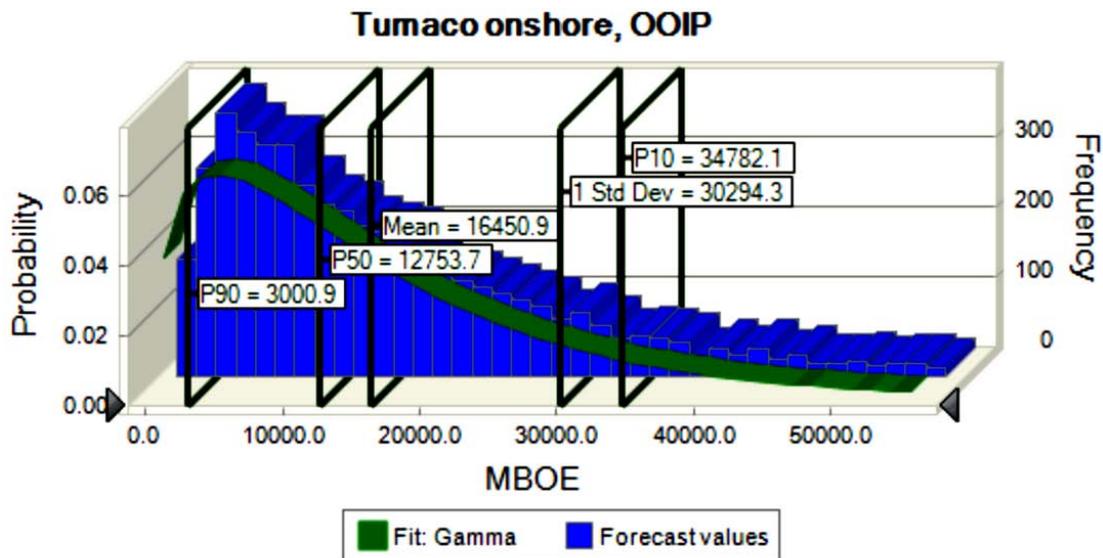


Figura 22. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Tumaco.

Pacífico y al Oeste con la fosa de subducción de Colombia en el Pacífico.

Las simulaciones probabilísticas de Monte Carlo realizadas indican un potencial promedio de 23.455,3 MBPE (Figura 23, Tabla 5).

#### Cuenca Valle Superior del Magdalena

La cuenca del Valle superior del Magdalena es una cuenca situada en la parte alta del Río Magdalena, que limita al Norte con el Cinturón Plegado de Girardot, al Sureste par-

cialmente con el sistema de fallas de Algeciras – Garzón, al Noreste con el sistema de fallas de Bituima – La Salina y al Oeste con la Cordillera Central. Un alto de basamento llamado el alto de Natagaima-El Pata divide esta cuenca en las subcuencas de Girardot y Neiva.

Las rocas reservorio se hallan relacionadas a la formación Caballos, Monserate y Gualanday, en acumulaciones de tipo estructural y/o estratigráfica, jugando la formación de Guaduala un buen papel como roca sello (Acosta *et al*, 1983 en Govea y Aguilar, 1986).

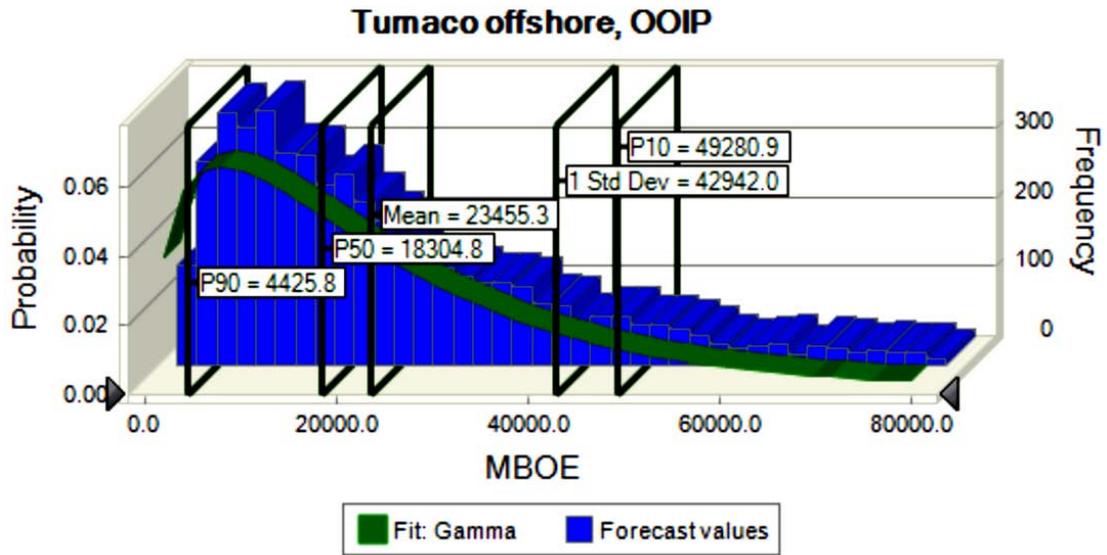


Figura 23. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Tumaco offshore.

Esta cuenca provee una gran producción en áreas pequeñas, cuenta con 53 campos y unas reservas 2P de 1.202 MBPE (IHS, 2008). La producción de yacimientos naturalmente fracturados no ha sido caracterizada y puede aportar importantes volúmenes. Las simulaciones probabilísticas realizadas en este trabajo indican un potencial promedio de 14.771,2 MBPE (Figura 24).

**Cuenca de Urabá**

La Cuenca de Urabá limita al Norte – Noroeste con Panamá, al Suroeste con el Batolito de Mandé y la falla de Murindó, al Este con el sistema de fallas de Uramita, al Oeste con la serranía de Darién y al Sur con la Cordillera Occidental.

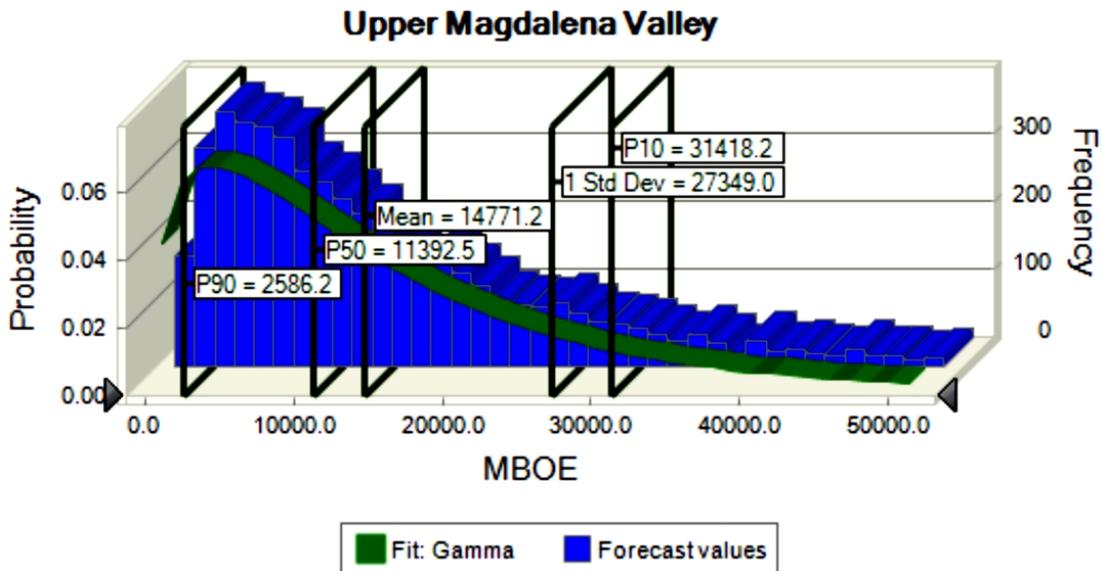


Figura 24. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca Valle Superior del Magdalena.

Esta cuenca presenta una gruesa sección Marina del Neógeno, pero el sistema petrolífero aún no ha sido estudiado. Las estimaciones probabilísticas de Monte Carlo realizadas en este trabajo indican un potencial promedio de 7.867,9 MBPE (Figura 25, Tabla 5).

**Cuenca de Vaupés-Amazonas**

Esta cuenca limita al Norte con el Arco de Vaupés, al Sur – Sureste con Perú y Brasil, al Oeste con la Serranía de

Chiribiquete y al Este con El Alto de la Trampa y la Mesa de Carurú.

Aun cuando el sistema petrolífero de esta cuenca no ha sido bien estudiado, su comportamiento puede ser parecido al de las cuencas Paleozoicas de Brasil y Bolivia, las cuales han tenido importantes descubrimientos. Las simulaciones probabilísticas realizadas indican un potencial promedio de 106.729,4 MBPE (Figura 26).

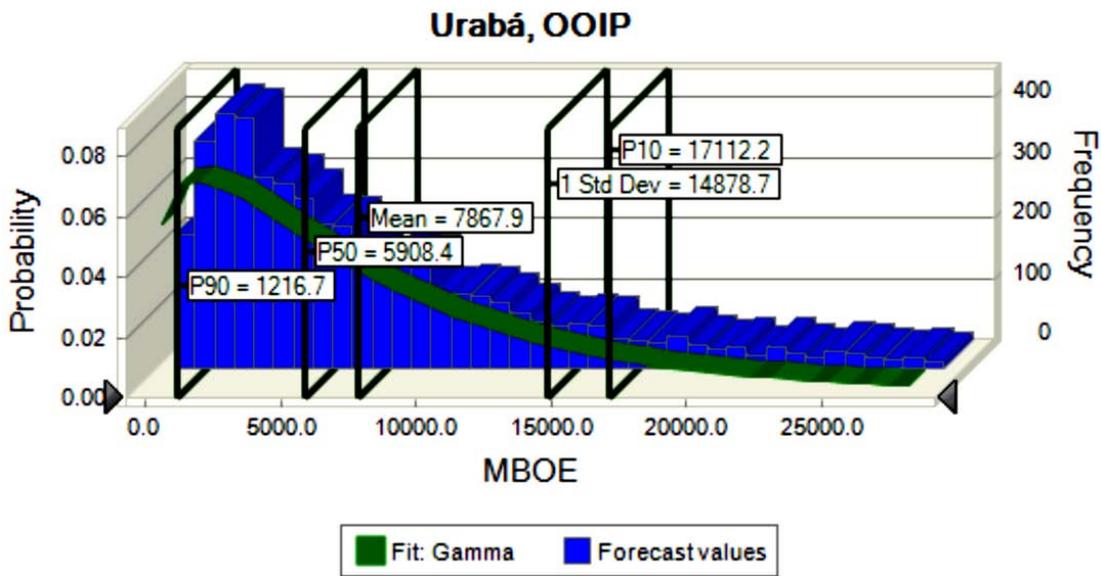


Figura 25. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Urabá.

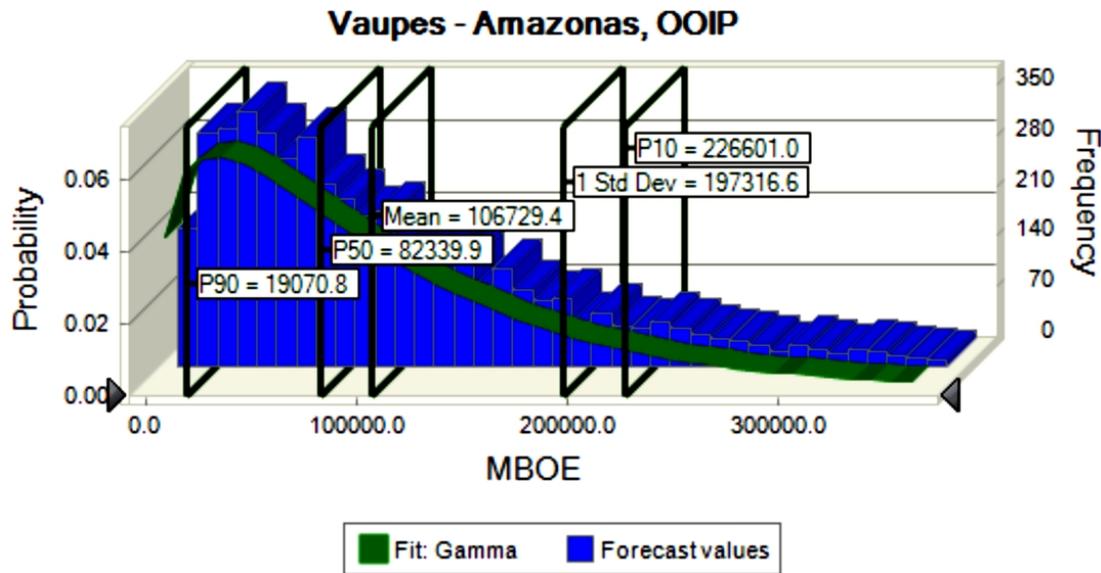


Figura 26. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para la cuenca de Vaupés-Amazonas.

## Discusión y Resultados

Las hipótesis con las que se desarrolla este trabajo evidencian una serie de limitaciones que deberán ser resueltas con nueva información adquirida en cada una de las cuencas. Se torna clave resolver problemas de espesor de yacimientos o “net pay” representativo por cuenca, en particular en cuencas fronterizas como Vaupés – Amazonas, Tumaco, Chocó, entre otras. Para el efecto será necesario realizar estudios sísmicos regionales que contemplen tendidos largos para garantizar detección de objetivos profundos, así como resoluciones amplias en banda frecuencial que permitan evaluar estratos con yacimientos potenciales. En esta misma línea, será necesario el desarrollo de pozos stratigráficos que alcancen el basamento económico y que garanticen la adquisición de información geoquímica y petrofísica.

No obstante, los resultados hallados en este trabajo nos dan buena idea sobre el potencial hidrocarbúfero del territorio colombiano. Según las estimaciones realizadas el rango de OOIP para los percentiles  $P_{10}$  –  $P_{90}$  son del orden de 1.368.621,4 – 569.024,4 MBPE y un valor promedio de 930.758,8 MBPE (Figura 27). Bajo escenarios relativamente conservadores podríamos castigar estos rangos con un riesgo geológico máximo del 30% y un factor de recobro máximo de 20%. Así las cosas el recurso prospectivo podría estar en el rango de 82.117,3 y 34.141,5 MBPE.

Teniendo en cuenta que hasta la fecha se han recuperado aproximadamente 7.000 MBPE, entonces, podemos

vislumbrar un importante recurso que espera ser hallado. Según el estudio más reciente (IHS, 2008) aún por hallar (YTF) existe un rango entre 859 – 13.874 MBE. Esta discrepancia con respecto a los resultados de éste trabajo se explica por dos situaciones claves:

1. Los estudios basados en aproximaciones fractales con la producción solo tienen en cuenta la historia de explotación, y
2. Las áreas donde se espera hallar nuevos recursos se circunscriben a aquellas donde actualmente se tiene explotación y/o ejercicio exploratorios con cierto detalle.

Evidentemente estas premisas impiden romper fronteras hacia áreas de una misma cuenca poco conocidas. En este trabajo se trasciende la presencia del recurso a lo largo de toda la cuenca. Esta condición es promotora de nuevos estudios que vayan más allá de los límites de exploración conocidos. Como ejemplo, en la Figura 28 se puede apreciar el ajuste fractal realizado por IHS (2008) para la cuenca de los Llanos Orientales. El recurso por hallar (área entre las curvas de distribución de campos descubiertos y futuros hallazgos) refleja únicamente las áreas circunscritas entre las zonas de producción de la cuenca en cuestión.

Por otra parte, los recursos no-conventionales podrían ascender a 80.000 MBPE (Arthur D’Little, 2008).

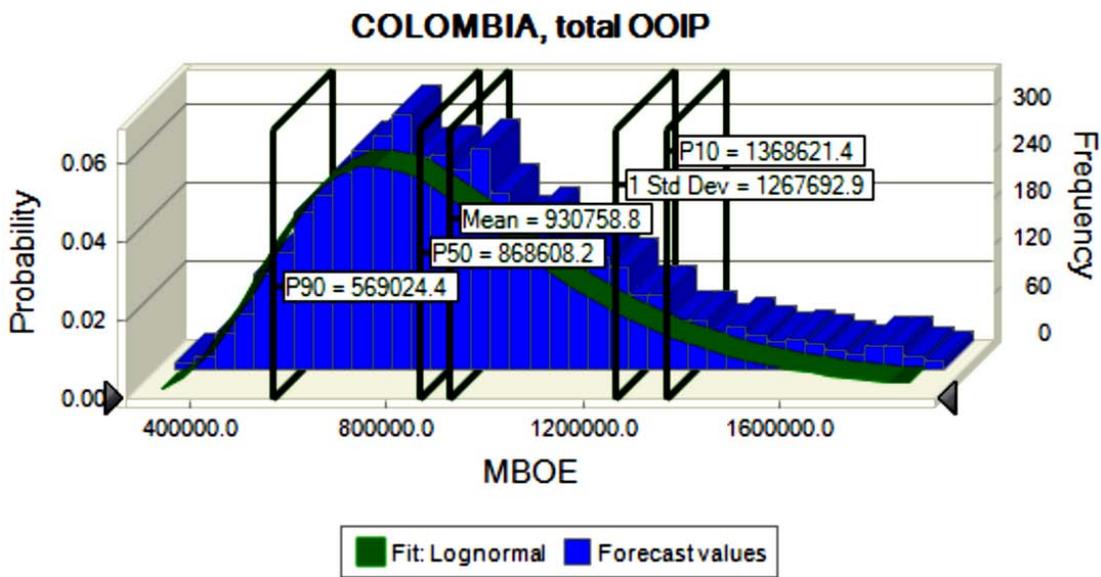
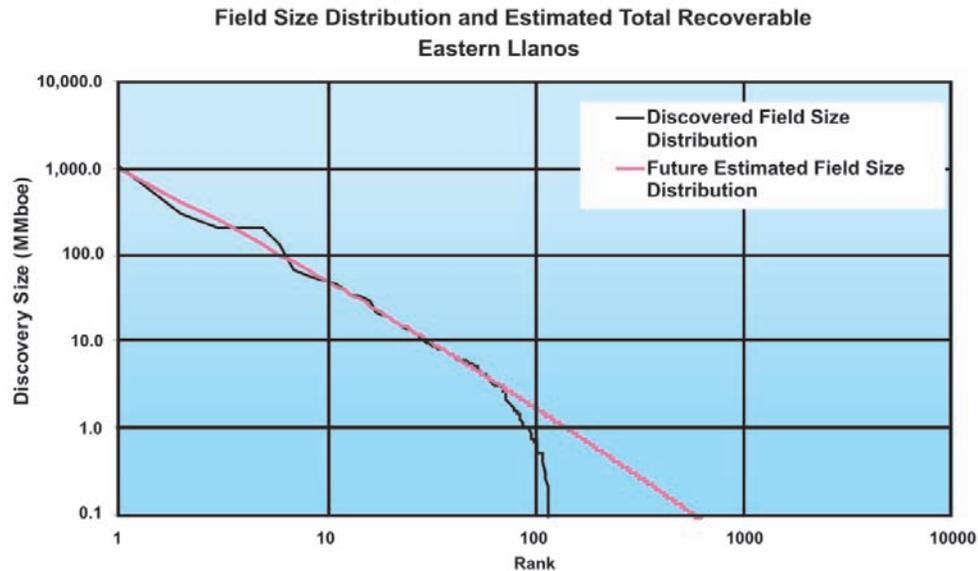


Figura 27. Resultados de la simulación por el método de Monte Carlo para toda Colombia.



**Figura 28.** Aproximación fractal para estimar el recurso recobrable por hallar para la cuenca de los Llanos Orientales (Tomado de IHS, 2008).

Estos recursos estarían ubicados principalmente en las cuencas marinas de frontera. Dicha cifra deberá ser depurada mediante ejercicios exploratorios sistemáticos en zonas profundas y ultra-profundas de las cuencas Colombia en el Caribe y el Pacífico. Ambas cuencas están inexploradas pero pueden presentar un potencial significativo en su margen oriental para el desarrollo de proyectos de hidratos de gas.

### Conclusiones

Ha sido desarrollado un ejercicio probabilístico basado en el método de Monte Carlo para estimar el rango de OOIP para las cuencas sedimentarias de Colombia. De las 23 cuencas sedimentarias presentadas por **Barrero et al.** (2007) se han excluido de estas estimaciones las cuencas Colombia profunda en el Caribe y el Pacífico debido a la falta de información y a la alta incertidumbre respecto a la distribución de los recursos. Las estimaciones para los percentiles  $P_{10} - P_{90}$  son del orden de 1.368.621,4 – 569.024,4 MBPE con un valor promedio de 930.758.8 MBPE. Bajo escenarios conservadores estos rangos con riesgo geológico máximo del 30% y factor de recobro máximo de 20% podrían sugerir un recurso prospectivo en el rango de 82.117,3 y 34.141,5 MBPE. La validación de estos resultados implicará despliegues exploratorios agresivos, particularmente sobre cuencas frontera.

### Referencias

- Barrero, D., Pardo, A., Vargas C. A. & Martínez, J.** (2007). Colombian sedimentary basins: nomenclature, Boundaries and petroleum Geology, a New Proposal. Primera Edición. Bogotá – Colombia.
- Arthur D'little** (2006). Estudio para la formulación de una estrategia nacional de abastecimiento energético. Informe final para la ANH.
- Arthur D'little** (2008). Potencial de recursos no convencionales en Colombia. Reporte interno, ANH.
- Bendeck, J.** (1985). Estadísticas de la Industria Petrolera Colombiana. Séptima edición, Ecopetrol, Bogotá.
- Ecopetrol** (1980). Cuencas Sedimentarias Colombianas. Cuaderno Técnico ICP.
- Ecopetrol** (2000). Atlas of sedimentary basins and petroleum geology of Colombia. Digital Atlas.
- Ecopetrol** (2001). Opportunities for Hydrocarbon Exploration & Production in Colombia.
- Govea, C. & Aguilera, H.** (1985). Cuencas Sedimentarias de Colombia. Memorias del II Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en la Cuencas Subandinas, pp. 1-93.
- Govea, C. & Aguilera, H.** (1986). Cuencas Sedimentarias de Colombia. Cuadernos Técnicos de Ecopetrol. 79 pp.
- HALLIBURTON** (2007). Estudio de prospectividad del Caribe Colombiano offshore. Informe interno - ANH.

- HALLIBURTON** (2008). Estudio de prospectividad del área de crudos pesados en los Llanos Orientales de Colombia. Informe Interno - ANH.
- IHS** (2008). Evaluation of resources and strategies for investment planing. Informe final para la Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH.
- Ivanhoe, L.F.** (1982). Regional petroleum geology and petroleum prospects of Colombia. Informe Geológico 1066. Ecopetrol, Bogotá.
- Kingston, D. R.; Dishroon, C. P. & Williams, P. A.** (1983). Global basin classification system. AAPG bulletin, Vol. 67 (12), pp. 2175-2193.
- Mora H., C.** (2000). Evaluación del potencial de los sistemas petrolíferos en las cuencas cretácicas con producción comercial en Colombia (Putumayo, Valle Superior de Magdalena, Valle Medio del Magdalena, Catatumbo y Llanos Orientales). Maestría en sistemas petrolíferos, Universidad Federal de Rio de Janeiro CENPES / PETROBRAS
- Ortiz, J.** (1997). Oportunidades de Desarrollo del Sector Hidrocarburos y su aporte a la Economía del País. Foro Internacional. "Cambio y Globalización: Oportunidades y Retos para la Industria Colombiana de los Hidrocarburos". Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. 21 pp.
- PeruPetro** (2003). [http://www.petroedgesolutions.com/peru\\_maranon\\_report.htm](http://www.petroedgesolutions.com/peru_maranon_report.htm)
- SPE/WPC/AAPG** (2001). Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources A Supplement to the SPE/WPC Petroleum Reserves Definitions and the SPE/WPC/AAPG Petroleum Resources Definitions. Society of Petroleum Engineers, ISBN 978-1-55563-105-5.
- Universidad Industrial de Santander** (2008). Informe de prospectividad de la cuenca Cesar-Ranchería. Informe interno, ANH.
- Universidad Industrial de Santander** (2009). Evaluación del potencial hidrocarburífero de las cuencas colombianas. Informe interno, ANH - FONADE.
- Universidad Nacional de Colombia** (2008). Informe de prospectividad de la cuenca de la Cordillera Oriental. Informe interno, ANH.
- USGS, Higley Debra** (2004). The Talara Basin Province of Northwestern Peru: Cretaceous-Tertiary Total Petroleum System. U.S. Geological Survey Bulletin 2206-A
- Vargas, C. A., Zamora & A., Pardo, A.** (2007). GEOINFORMATION DENSITY: A criterion on ANH Block Negotiation. Earth Sciences Research Journal, v.11, n.1, p.5 - 19
- ZIFF Energy Group** (2007). Estimación, análisis y comparación de los costos de exploración y producción de hidrocarburos en las Cuencas colombianas y diseño de una metodología.

Recibido: mayo 20 de 2009.

Aceptado: junio 4 de 2009.



# ANÁLISIS DERMATOGLÍFICO EN POBLACIONES COLOMBIANAS DE COYAIMA Y BOGOTÁ

Por

José V. Rodríguez Cuenca<sup>1</sup> & Dustano Luis Rojas Garcés<sup>2</sup>

## Resumen

**Rodríguez Cuenca, J. V. & D. L. Rojas Garcés:** Análisis dermatoglífico en poblaciones colombianas de Coyaima y Bogotá. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(126): 45-60, 2009. ISSN 0370-3908.

Se analizan mediante procedimientos univariados y multivariados dos muestras de Bogotá y Coyaima (Tolima) según la variación de rasgos digitales y palmares. Las pruebas señalan diferencias significativas tanto a nivel sexual como grupal en las configuraciones de las líneas D y B, áreas Th/I y IV y en el dedo pulgar (I). Coyaima observa mayor frecuencia de torbellinos digitales (72%) que los grupos mestizos (cerca de 42%); también de configuraciones palmares. En el ámbito intergrupar Bogotá se aproxima a otras muestras reportadas de Bogotá y Cali, y a españolas. La muestra de Coyaima por su proximidad a mestizos y españoles podría denotar mestizaje reciente. Las configuraciones palmares son más discriminantes en los análisis intra-intergrupales que las digitales.

**Palabras clave:** dermatoglífica, mestizos de Bogotá, indígenas de Coyaima, análisis multivariado.

## Abstract

Finger and palmar prints of 110 female and 58 male of Bogotá and 31 male and 29 female of Coyaima were examined for evidence of their sexual and population variation. Comparisons show striking sexual and intergrupar differences in pattern frequencies in the main lines D and B, thenar/I and IV interdigital areas of palm, and in frequency of thumb finger pattern. Bogotá and Cali are similar with respect to Spanish populations to relatively high frequency of loops finger configurations. Similarities among Coyaima and other mestizo may reveal a recent mixed process. Palmar pattern are more discriminatory than digital pattern configuration in intergrupar analysis.

**Key words:** Coyaima indians, Bogotá mestizo, dermatoglyphics, ethnic relationships.

1 Profesor Titular Departamento de Antropología Universidad Nacional de Colombia, Ph. D., miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.

2 Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, Maestría en Etnología.

### 1. Las aplicaciones antropológicas, judiciales y clínicas de la dermatoglífica

La dermatoglífica es un término acuñado en 1926 por Harold Cummins, y se considera el estudio de las configuraciones dermopapilares finas de los dedos y palma de manos y pies, empleada para la identificación de personas, en los estudios poblacionales para establecer diferencias entre grupos étnicos (poblamiento, orígenes), y en casos clínicos relacionados con defectos de nacimiento (Cummins, Midlo, 1961; Penrose, 1968; Heet, 1983). En sentido estricto, la dermatoglífica estudia las configuraciones de las crestas epidérmicas que forman sistemas de líneas paralelas en pequeños campos de la superficie del estrato córneo; los poros de las glándulas sudoríparas se ubican en el centro de las crestas y las depresiones entre las crestas se conocen como surcos (Penrose, 1968: 1).

Dentro de los principios biológicos que hacen de esta disciplina atractiva para la identificación humana tenemos:

1. Las crestas epidérmicas individuales son muy variables, de tal manera que sus características, aún en áreas pequeñas de los dedos, palma de la mano o planta de los pies, no se duplican en ninguna otra región o en un individuo diferente.
2. Las configuraciones y detalles de las crestas individuales son permanentes y no cambian con el tiempo.
3. Los tipos de configuración son variables individualmente, pero varían dentro de límites tales que permiten su clasificación sistemática.

Por esta razón se considera que los dactilogramas son perennes, inmutables –no pueden modificarse fisiológica, voluntaria ni patológicamente– y diversiformes.

De aquí se deriva su relativa fácil aplicación antropológica (Garruto *et al.*, 1979: 311; Heet, 1983: 6; Vargas, Bustos, 1988: 48; Meier, 1991: 256):

1. Las técnicas de recolección –impresiones en tinta– son muy baratas, de fácil obtención, lectura y conservación.
2. Existen amplias bases de datos a nivel mundial lo que permite estudios poblacionales comparativos.
3. La presencia de rasgos cualitativos y cuantitativos de dedos y palma de la mano ofrece una amplia batería de rasgos comparativos.
4. Sirve para caracterizar y comparar grupos según las diferencias interdigitales, asimetría bilateral, dimorfismo sexual, a nivel local, regional, continental o hemisférica.

5. Sirve para analizar el flujo génico, la migración entre aldeas, medidas de distancia entre grupos, las relaciones históricas y genéticas antiguas entre pueblos, los patrones de matrimonio –intercambio de mujeres, patrilocalidad–.

Por otro lado, tienen aplicación clínica, pues los rasgos dermatoglíficos se forman hacia el cuarto mes de vida intrauterina y no cambian con la edad, excepto en tamaño y alteraciones ontogénicas tempranas; algunas configuraciones –entre ellas altas frecuencias de arcos– se asocian a alteraciones cromosómicas y a síndromes como el Langdon-Down, Turner, Trisomía 18, Trisomía D, Klinefelter, Rubinstein-Taybi, XYY, enfermedades congénitas del corazón, rubéola prenatal y aborto espontáneo, por lo que su reconocimiento fenotípico temprano puede contribuir a tratamientos clínicos preventivos (Mavalwala *et al.*, 1969: 209; Babler, 1978: 26; Chakraborty, 1991: 157; Schaumann, Opitz, 1991: 204).

Finalmente, en Criminalística y Ciencias forenses tiene una amplia aplicación para la identificación humana pues las fichas dactilares, especialmente en los países donde es obligatorio su registro, permite mediante el sistema AFIS identificar una persona en pocos minutos (Antón *et al.*, 1998).

No obstante, uno de los mayores problemas en los análisis poblacionales es que diferentes autores emplean distintas formas de presentar los resultados y no se exponen suficientes datos con los que se puedan efectuar comparaciones intergrupales (Serrano, 1982; López, 1995).

En Colombia son muy pocos los trabajos sistemáticos poblacionales, y se limitan a grupos urbanos de Bogotá (Bernal, 1974; Vargas, Bustos, 1988; Forero, 1988; Rojas, 2000), Cali (De la Cruz, 1984), y de indígenas de Coyaima, Tolima (Rojas, 2000). Infortunadamente es difícil estudiar las poblaciones indígenas pues no se dejan tomar las huellas dactilares, especialmente con tinta negra en atención a su pensamiento cosmogónico (Rojas, 2000: 22); por otro lado, los organismos estatales le ven poca aplicabilidad a los estudios poblacionales. Siguiendo el programa de investigación sobre la variabilidad poblacional de Colombia que adelanta el LAF presentamos los resultados de la sistematización y análisis de las huellas dermopapilares recolectadas por su equipo, con el fin de contribuir con los procesos de identificación de personas del país, dado que tenemos un origen triétnico (indígena, hispánico, africano), con un alto componente indígena materno –Madre América–, y paterno hispánico y africano –Padre España y África– (Rodríguez, 2004: 66).

## 2. Las configuraciones digitales

En los dedos de manos y pies se reconocen básicamente tres figuras según el número de trirradios o deltas: arcos, presillas y torbellinos (Penrose, 1968: 4) (Fig. 1).

Torbellino, rizo, verticilo (W): presenta dos trirradios (deltas) con diseño concéntrico, y crestas alrededor de un núcleo área patrón encerrada por las líneas tipo.

Presilla, asa, bucle (L): observa solamente un trirradio (delta), y las crestas se encorvan alrededor de un solo extremo del patrón, formando la cabeza de la presilla (L).

Arco (A): no tiene trirradio (delta), las crestas pasan de un margen a otro del dedo, con barrido arqueado.

Geométricamente, el punto trirradial o delta se considera el encuentro de tres radiantes que conforman un ángulo aproximado de 120°, demarcando tres regiones. El rasgo característico de la presilla (L) es que la dirección de un campo paralelo de líneas se orienta hacia dos ángulos rectos (180°). El corazón de una presilla típica es tanto el final de una cresta sencilla (barra o rod), o una línea que regresa y forma dos crestas adyacentes (grapa o staple); si las líneas convergen se denomina presilla convergente; un tipo raro ondulado es el mutante; dos presillas en asociación cercana o fusionadas para conformar un círculo se denomina torbellino (W), y las líneas de crestas se orientan en un ángulo de 360° (Penrose, 1968: 4-5).

Cuando el corazón está formado por la punta de una de las líneas de un trirradio se denomina arco en tienda (T, At, La), aunque en realidad es una presilla. Cuando la presilla se orienta hacia ulnar se denomina U o Lu; cuando se orienta hacia radial se llama R o Lr. Una presilla doble se denomina Wd, Ws –si el corazón forma un espiral– o D.

El índice del patrón de intensidad (Pattern Intensity Index, PII) se calcula como el número de trirradios, donde el arco tiene un valor de 0, la presilla posee uno y el torbellino dos ( $PII = (L+2W)/10$ ), con un valor entre 0 y máximo 20. El índice de Furuhashi se calcula como  $W \times 100 / (Lu+Lr)$  y el de Dankmejer como  $(A/W) \times 100$ . Las crestas que contiene un trirradio se pueden contar desde el punto del trirradio al punto del corazón, siguiendo una línea recta, contabilizándose todas las crestas que cruce la línea, incluida la final, exceptuando las nacientes. Para todos los dedos se denomina Conteo Total de Crestas (TRC).

## 3. Las configuraciones palmares

En la palma de la mano tenemos seis áreas con nomenclatura hypotheneal (Hy) –porción ulnar–, thenar (Th) –cuadrante próximo-radial– y las interdigitales I –que se agrupa con la Th en Th/I–, II, III y IV. En la base de los dedos II (índice), III (corazón), IV (anular) y V (meñique) se forman cuatro trirradios o deltas que se denominan a, b, c y d, respectivamente; si se presentan trirradios adicionales se denominan a', b', c', d'; si el trirradio interdigital se une a dos dedos por la ausencia de un delta se llama bc o cd. Las figuras pueden ser presillas (L), torbellinos (W) y arcos en tienda (T); las otras configuraciones no son verdaderos patrones: arcos planos (A), campos abiertos (O), multiplicaciones (M) y vestigios (V) (Fig. 2).

Las líneas palmares principales o radiantes que surgen del trirradio se denominan A, B, C y D (Fig. 3); éstas desembocan en distintos campos o intervalos interdigitales (1, 2, 3, 4, 5', 5'', 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13', 13'' en sentido contrario a las manecillas del reloj). En caso de ambigüedad se designan como dual (11/5') si hay dos

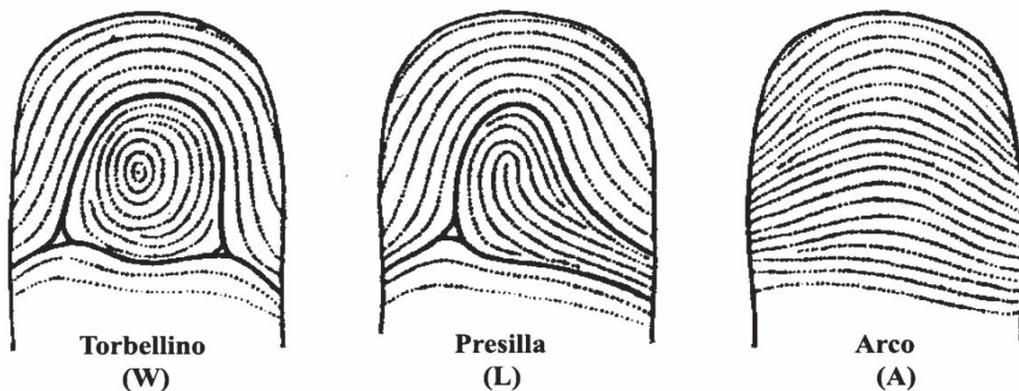


Figura 1. Diagrama de configuraciones digitales (modificado de Cummins, Midlo, 1961: 56).

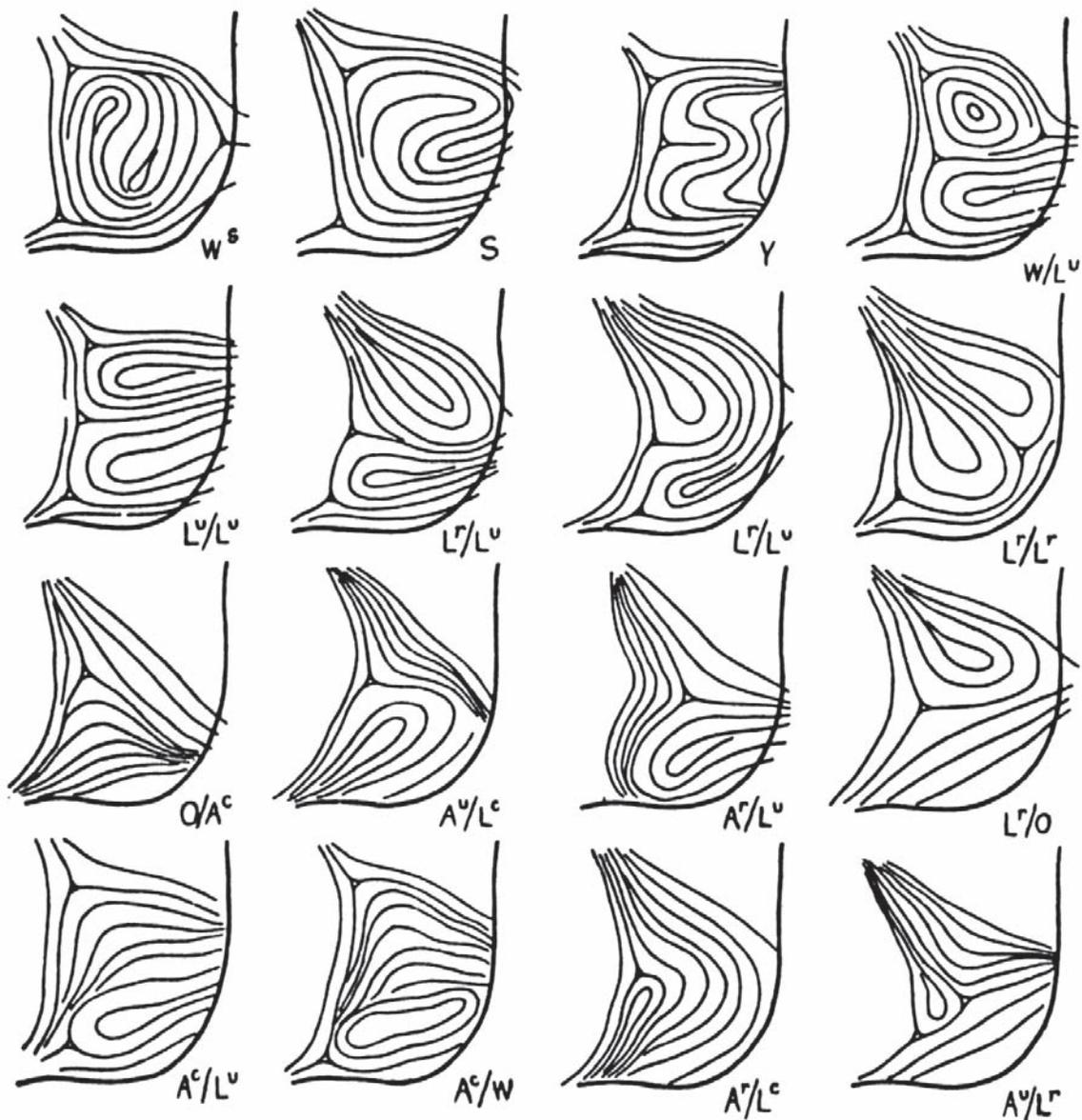


Figura 2. Configuraciones en el área hypothenar (modificado de Penrose, 1968: 7).

posibilidades; alternativo (11(10)) si no hay más de dos crestas próximas, siendo el primer número el trazado inicial; abortiva (X) si no se presenta, aunque exista el trirradio; ausente (O) si hay ausencia de trirradio y por consiguiente de la línea principal; accesoria si se observa un radiante adicional (11-7); *id* en ausencia del trirradio –sin puntuación– u *oido* indicando la ausencia de dos trirradios y la ocurrencia de un trirradio interdigital en relación con el tercer intervalo (v.gr. 11.oido.5' si están ausentes los trirradios b y c).

Para la línea D las terminaciones se agrupan en tres tipos modales: el tipo 7 (agrupa los intervalos 7, 8, X, 5), el tipo 9 (agrupa 9, 10) y el tipo 11 (agrupa 11, 12, 13). Para la línea A se han definido tres tipos modales: el tipo 5 (7, 6, 5'', 5'), el tipo 3 (4, 3) y el tipo 1 (1, 2). El índice de la línea media (Main Line Index) expresa los rasgos más distintivos y se computa a partir de los valores de los tipos 11 y 7 ( $Md = 9 + 2x(t_{11} - t_7)/100$ ). El índice de Cummins ( $Ic$ ) se calcula como la sumatoria de los valores de las líneas A ( $\Sigma A$ ) y D ( $\Sigma D$ ) o  $Ic = (\Sigma D + \Sigma A)/200$  (Cummins, Midlo, 1961: 113-114).

| Líneas |   |      |     | T  | Áreas |      |    |     |    | Digitales |    |     |    |   |
|--------|---|------|-----|----|-------|------|----|-----|----|-----------|----|-----|----|---|
| D      | C | B    | A   | t  | Hy    | Th/I | II | III | IV | I         | II | III | IV | V |
| 11(10) | X | 7(6) | 4/1 | t' | V/At  | O    | O  | V   | V  | W         | R  | R   | R  | T |

/: fórmula dual

( ): fórmula alternativa (delta adicional)

X: línea media abortiva

O: ausencia de trirradio (delta)

-: radiante accesorio

OidO: ausencia de B y C

El trirradio axial tiene habitualmente tres tipos (Fig. 3):

t'': distal

t': intermedio

t: proximal

Índice t: distancia del trirradio axial desde Ax100/AB

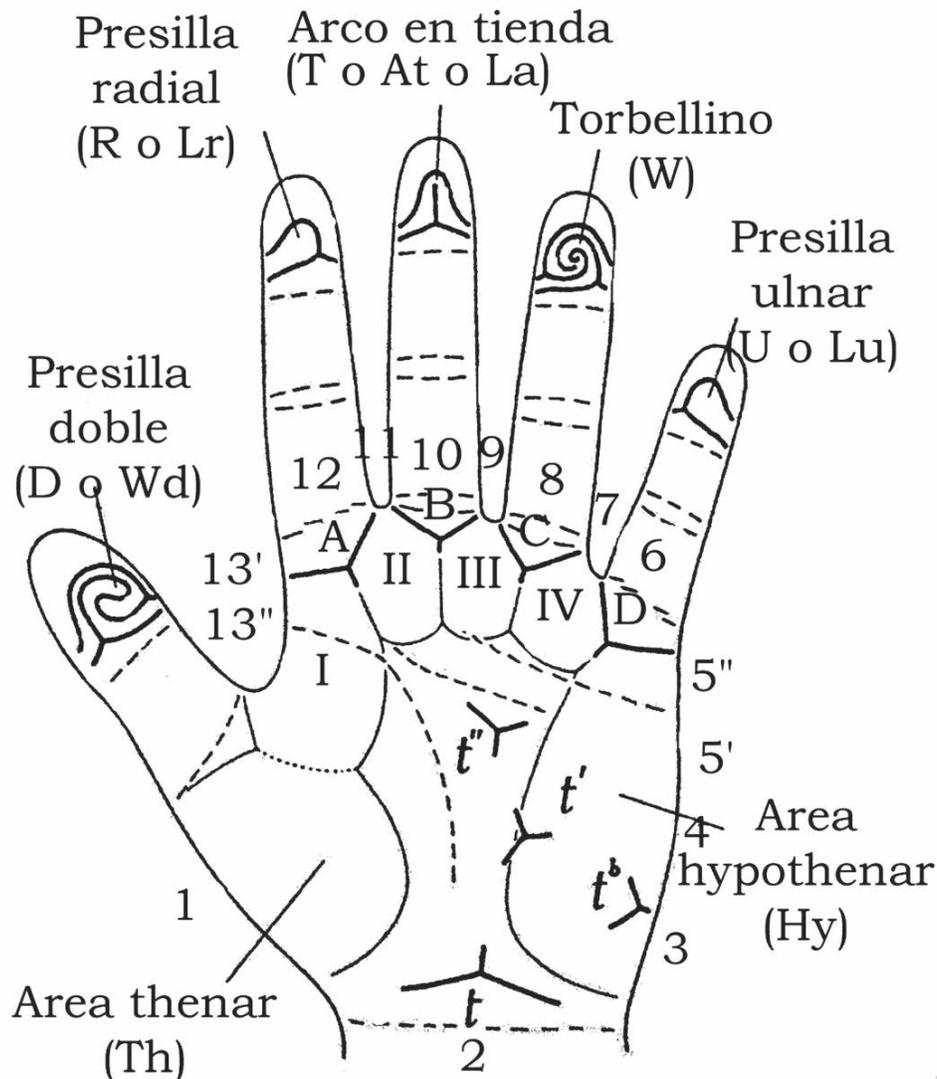


Figura 3. Diagrama de la palma y dedos con las áreas (Th, Hy, I, II, III, IV), líneas principales (A, B, C, D), delta axial (t) y configuraciones digitales (D, R, T, W, U) (Modificado de Penrose, 1968: 5).

#### 4. La dermatoglífica en los estudios poblacionales

Los estudios de grupos poblacionales de diferentes partes del mundo han establecido el potencial diagnóstico diferenciador de algunos rasgos dermatoglíficos (**Meier**, 1991).

Quizás el país con mayor número de grupos estudiados bajo una metodología estandarizada es la antigua Unión Soviética, donde se han analizado más de 100 grupos étnicos europeos y asiáticos, compuestos por más de 22.000 personas, investigación liderada por **Henrietta Heet** (1983: 7). Aquí se estableció que los rasgos independientes entre sí –que observan muy poca relación biológica intragrupal-, con alto poder diferenciador territorial intergrupala, son los índices de intensidad patrón (IIP), el de las líneas palmares principales de Cummins, el trirradio o delta axial (t), los patrones palmares del hypothenar (Hy), thenar (Th/I) y los deltas adicionales interdigitales. No obstante, la región Th/I varía erráticamente y no sirve para diferenciar grandes grupos geográficos poblacionales. De acuerdo a este estudio, la variabilidad se incrementa desde los niveles taxonómicos inferiores a los superiores, planteando que posiblemente las barreras interétnicas constituyeron el principal factor de diferenciación poblacional en las regiones. En el ámbito territorial se evidenció que las poblaciones mongoloides son un poco menos homogéneas que las caucasoides, especialmente entre los grupos femeninos. Finalmente, a nivel regional se observó que la población de los Urales (Janti, Mansi) son muy particulares pues comparten rasgos tanto mongoloides como caucasoides, lo que apoyaría la hipótesis de que en su origen –culturas Afanasyev, Tagarsky y Andronovskaya) hubo un aporte caucasoides antiguo, y no se sustenta la idea de un origen protomorfo (indiferenciado o no especializado morfológicamente). Una discusión en este sentido desde la perspectiva craneométrica se ha planteado con relación a los orígenes de las poblaciones paleoamericanas (**Rodríguez**, 1987).

En el estudio de más de 100 grupos indígenas de Norte, Centro y Suramérica (**Garruto et al.**, 1979: 325; **Hoff et al.**, 1981: 460) se ha señalado que los rasgos dermatoglíficos más útiles en los análisis poblacionales amerindios son los patrones de las regiones interdigitales del Hy, Th/I, III y IV, demostrando la importancia de la heredabilidad de esas variables. El área interdigital II también se encuentra bajo control genético, pero no observa mucha variabilidad, aunque se puede usar en conjunción con las otras variables. Los tipos modales de la línea D no parecen ser muy informativos, por lo que se sugiere el empleo del índice de la línea media. La línea modal C es útil cuando se usa en combinación con los otros seis rasgos.

Los rasgos dermatoglíficos establecen una relación cercana entre poblaciones andinas y amazónicas, posiblemente por un origen común o flujo génico significativo entre ellas (**Hoff et al.**, 1981: 459). En general, los amerindios presentan la mayor frecuencia de patrones palmares en las áreas interdigitales Th/I entre los seis mayores grupos geográficos poblacionales. Las frecuencias de los patrones III y IV son relativamente bajas. Por los patrones palmares los amerindios se aproximan más a los australoasiáticos y asiáticos orientales que a caucasoides, negroides e indígenas asiáticos. Igualmente, expresan frecuencias bajas de conteo total de crestas (TRC) que los caucasoides, indígenas asiáticos y australoasiáticos, aunque en este rasgo se aproximan a los negroides. Los esquimales presentan mayor afinidad dermatoglífica con los amerindios que con otros grupos poblacionales. Los australoasiáticos observan las menores frecuencias de deltas axiales e interdigitales de las seis poblaciones (**Garruto et al.**, 1979:328).

Mediante el conteo de crestas digitales (TRC) de poblaciones aisladas del Departamento Pocho, Argentina (**Demarchi, Marcellino**, 1996: 250-251) se encontró que expresan valores inferiores a los grupos caucasoides, concluyéndose que los dermatoglíficos constituyen variables eficientes en la discriminación interpoblacional, y los resultados coinciden con la distribución geográfica y las relaciones poblacionales.

Los estudios dermatoglíficos de muestras colombianas han hecho énfasis en la variación dactilar, indicando mucha similitud entre los grupos de Bogotá (**Bernal et al.**, 1974; **Bustos, Vargas**, 1988) y Cali (**De la Cruz**, 1984), con una baja frecuencia de torbellinos (27% y 28%, respectivamente), alta de presillas (62% y 64%, respectivamente) y muy baja de arcos; las frecuencias más elevadas de torbellinos se aprecian en el dedo pulgar (42,3% y 36,9%, respectivamente), similar a los grupos caucasoides. Muy poco uso se le ha dado al análisis palmar (**Forero**, 1988; **Rojas**, 2000), pero se ha señalado asimetría bimanual.

En general, los rasgos dermatoglíficos permiten diferenciar tanto grupos territoriales como regionales en el ámbito mundial. Así, en las poblaciones europeas se aprecia una tendencia a frecuencias elevadas de presillas digitales y bajas de torbellinos. Entre los grupos asiáticos y amerindios esta tendencia se invierte; en los europeos se evidencian bajas frecuencias de patrones en el área Th/I y altas de Hy; altas frecuencias en el área interdigital III y bajas en IV (**Serrano**, 1982: 160).

#### 5. Las muestras colombianas

Las huellas fueron recolectadas mediante la técnica de impresión con tinta sobre vidrio, presionando sobre la parte

dorsal de la palma de la mano de cada sujeto con el fin de obtener una impresión nítida, especialmente de la parte cóncava. Se obtuvieron huellas de ambas manos y de todos los dedos las que fueron observadas con lupa 2X. Para cada mano se estableció la respectiva fórmula palmar y digital, y los datos fueron consignados en una base bajo el ambiente SPSS versión 12.5 para su respectivo análisis estadístico.

### 5.1. Coyaima

Las muestras del municipio de Coyaima fueron recolectadas –después de haber obtenido la respectiva autorización del Consejo Regional Indígena del Tolima (CRIT) previa presentación de la propuesta de investigación– en niños de las escuelas de Ilarco, Amayarco, Aico, Torazo, Piedras y Urbana. En esta región sobreviven grupos indígenas de la etnia Pijao que encontraron los españoles a su llegada en el siglo XVI, y que sometieron a una guerra de tierra arrasada en el siglo XVII con el fin de dominarlos. El territorio de los *pinaos*, o como se les llamó posteriormente pijaos según fray **Pedro Simón** (1981, V: 261-262), se ubicaba al suroeste de Santafé, entre la jurisdicción de Bogotá y Popayán; incluía las provincias de Cutiba, Aype, Valle de las Hermosas, Irico, Paloma, Ambeima, Amoyá, Tumbos, Coyaimas, Mayto, Mola, Atayma, Cacataima y Tuamo, estas dos últimas ubicadas cerca a la ciudad de Ibagué. Sus tierras se extendían por el sur hasta Las Carnicerías (cerca de Timaná, Huila); por el occidente cubrían las tierras escarpadas, montañosas y templadas de la cordillera Central, hasta Mariquita y Cartago, al norte; por el este se extendían hasta el río Grande de la Magdalena, tierras llanas y cálidas. Eran todos de una misma lengua, costumbres, religión, disposición de cuerpos y cabezas, incluida la costumbre de deformar la cabeza.

No obstante, sus incursiones guerreras abarcaban los límites del Nuevo Reino de Granada y de Popayán, afectando entre ellas las ciudades de Ibagué, Cartago (hoy Pereira), Buga y Timaná (**Simón**, VI: 327-328, 446).

Por esta razón, los españoles construyeron el fuerte del Chaparral, Tolima, en el flanco oriental de la cordillera Central, desde donde organizaron la guerra de tierra arrasada contra los pijaos. Los sobrevivientes se escondieron en las montañas de la cordillera Central, y sus tierras fueron repartidas entre los conquistadores y sus descendientes encomenderos y latifundistas. Desde 1938 funcionan los resguardos de Ortega, Coyaima y Chaparral, mismos que fueron nuevamente conformados después de una ardua lucha por el reconocimiento de los derechos indígenas.

La muestra está integrada por 31 niños y 29 niñas recolectada por Dustano Rojas en 1994 (**Rojas**, 2000), considerados de origen preponderantemente indígena ya que históricamente los pijaos se opusieron al mestizaje.

### 5.2. Bogotá

La muestra está conformada por 110 mujeres y 58 varones, estudiantes de pregrado y postgrado de Antropología de la Universidad Nacional de Colombia, recolectada por ambos autores. El grupo se puede considerar mestizo andino, es decir, una mezcla entre indígena, básicamente por línea materna, y español, preponderantemente por línea paterna. Esta hibridación ha configurado un mestizo con haplogrupos mitocondriales en casi 70% de origen indígena (haplogrupos A, B, C, D), y cromosoma Y de origen hispánico en aproximadamente 80% (**Rodríguez**, 2004: 56). Fenotípicamente se podría esperar que los rasgos dermatoglíficos combinen las características dermopapilares de ambos troncos ancestrales, indígena y español.

### 5.3. Análisis intragrupal

La terminación más frecuente de la línea D (Tabla 1) entre el grupo Coyaima es la 7, seguida de la 9 y 11, especialmente en la mano izquierda donde se aprecia marcada lateralidad. En Bogotá la más frecuente es la 9, seguida de la 11 y la 7; cuadro similar a los mestizos masculinos mexicanos (9, 11, 7), pues las mujeres presentan la secuencia 11, 9 y 7 (**López**, 1995: 282). Según la prueba de Kolmogorov-Smirnov la línea D diferencia significativamente ambos grupos y lados, pero no en el ámbito sexual. En caucasoides predomina la secuencia 9, 11 y 7 u 11, 9 y 7 (**Heet**, 1983: 196).

Habitualmente se tiene en cuenta la ausencia (X) de la línea C (Tabla 2), en donde el grupo de Bogotá expresa una mayor frecuencia (25,9%) que el de Coyaima (12,9%), con diferencia significativa desde el punto de vista estadístico. En el ámbito sexual existen diferencias significativas, especialmente en Coyaima, como también en la lateralidad. En general, en ambos grupos predominan las terminaciones en región ulnar (5, 6, 7) que radial (8, 9, 10, 11). En mongoloides de Siberia e indígenas la frecuencia de ausencia de la línea C es baja; también en caucasoides donde predomina la terminación radial (área 9).

La línea B (Tabla 3) desemboca mayoritariamente en el espacio ulnar 5, siendo más frecuente en 5' en Coyaima (45,3%) y 5'' en Bogotá (37,0), con diferencias estadísticamente significativas, al igual que en el ámbito de la lateralidad; a nivel sexual no existen mayores disimilitudes. En caucasoides y mongoloides predomina la región 7, seguida de la 5'' y 5', respectivamente.

**Tabla 1.** Distribución de las terminaciones de la línea D

| Grupo | COYAIMA |      |      |      | BOGOTÁ |      |      |      |
|-------|---------|------|------|------|--------|------|------|------|
|       | F       |      | M    |      | F      |      | M    |      |
|       | I       | D    | I    | D    | I      | D    | I    | D    |
| 0     |         | 3,6  |      |      |        | 1,8  |      | 3,4  |
| 3     |         |      |      |      |        |      |      | 1,7  |
| 5''   |         |      |      |      | 1,8    | 8,3  |      |      |
| 7     | 51,7    | 17,9 | 54,8 | 9,7  | 16,2   | 26,6 | 10,3 | 25,9 |
| 8     | 13,8    | 14,3 | 3,2  | 16,1 | 9,0    | 10,1 | 6,9  | 6,9  |
| 9     | 17,2    | 39,3 | 29,0 | 41,9 | 28,8   | 30,3 | 22,4 | 37,9 |
| 10    | 3,4     | 7,1  | 6,5  | 12,9 | 16,2   | 9,2  | 13,8 | 8,6  |
| 11    | 13,8    | 17,9 | 6,5  | 19,4 | 27,9   | 13,8 | 46,6 | 13,8 |

**Tabla 2.** Distribución de las terminaciones de la línea C

| Grupo | COYAIMA |      |      |      | BOGOTÁ |      |      |      |
|-------|---------|------|------|------|--------|------|------|------|
|       | F       |      | M    |      | F      |      | M    |      |
|       | I       | D    | I    | D    | I      | D    | I    | D    |
| X     | 13,8    | 21,4 | 6,5  | 9,7  | 23,4   | 26,6 | 19,0 | 34,5 |
| 5''   | 20,7    | 14,3 | 32,3 | 9,7  | 10,8   | 25,7 | 8,6  | 20,7 |
| 7     | 20,7    | 28,6 | 29,0 | 35,5 | 28,8   | 20,2 | 27,6 | 19,0 |
| 9     | 13,8    | 17,9 | 19,4 | 32,3 | 23,4   | 16,5 | 32,8 | 13,8 |

**Tabla 3.** Distribución de las terminaciones de la línea B

| Grupo | COYAIMA |      |      |      | BOGOTÁ |      |      |      |
|-------|---------|------|------|------|--------|------|------|------|
|       | F       |      | M    |      | F      |      | M    |      |
|       | I       | D    | I    | D    | I      | D    | I    | D    |
| 5'    | 51,7    | 39,3 | 48,4 | 41,9 | 16,2   | 33,0 | 13,8 | 22,4 |
| 5''   | 13,8    | 14,3 | 16,1 | 19,4 | 36,0   | 43,1 | 22,4 | 46,6 |
| 7     | 24,1    | 25,0 | 25,8 | 22,6 | 26,1   | 13,8 | 36,2 | 19,0 |

En ambos grupos predomina la terminación de la línea A (Tabla 4) en el campo 3 (áreas 3 y 4), con diferencias significativas a nivel de grupo y sexo; cuadro similar se presenta también en caucasoides y mongoloides, como también en mestizos mexicanos (López, 1995: 282). Es una variable dimórfica con relación a la variación grupal, sexual y lateralidad.

El trirradio axial t (Tabla 5) observa una distribución similar a la de otras poblaciones del mundo, donde predomina el patrón (proximal o carpal) t, seguido de t' (intermedio) y muy baja frecuencia de t'' (distal). Las diferencias son significativas entre grupos pero no entre sexos y lateralidad.

**Tabla 4.** Distribución de las terminaciones de la línea A

| Grupo | COYAIMA |      |      |      | BOGOTÁ |      |      |      |
|-------|---------|------|------|------|--------|------|------|------|
|       | F       |      | M    |      | F      |      | M    |      |
|       | I       | D    | I    | D    | I      | D    | I    | D    |
| 3     | 24,1    | 7,1  | 25,8 | 16,1 | 9,9    | 12,8 | 10,3 | 25,9 |
| 4     | 51,7    | 57,1 | 54,8 | 51,6 | 45,9   | 58,7 | 44,8 | 37,9 |
| 5'    | 20,7    | 35,7 | 12,9 | 25,8 | 39,6   | 22,9 | 37,9 | 24,1 |

**Tabla 5.** Distribución del patrón del trirradio axial t

| Grupo | COYAIMA |      |      |      | BOGOTÁ |      |      |      |
|-------|---------|------|------|------|--------|------|------|------|
|       | F       |      | M    |      | F      |      | M    |      |
|       | I       | D    | I    | D    | I      | D    | I    | D    |
| t     | 75,9    | 75,0 | 67,7 | 58,1 | 74,8   | 77,1 | 77,6 | 77,6 |
| t'    | 24,1    | 25,0 | 25,8 | 38,7 | 19,8   | 22,9 | 19,0 | 20,7 |
| t''   | 0       | 0    | 6,5  | 3,2  | 5,4    | 0    | 3,4  | 1,7  |

El grupo de Coyaima manifiesta mayor frecuencia en figuras del área hypothenar (Fig. 2; Tabla 6), con 16,1% contra 12,1% en Bogotá. No obstante, no expresa dimorfismo grupal, sexual ni lateralidad. En los indígenas americanos su frecuencia es relativamente baja, tanto en Norteamérica (11%), Centroamérica (13%) como en Suramérica (16%); es más elevada en Asia (13,3-55,4%) y en Europa (21-51,2%). En una muestra de Bogotá se reporta un 30,1% de figuras en esta área (Vargas, Bustos, 1988: 55)<sup>1</sup>, mientras que en 450 escolares de algunos colegios bogotanos apenas 13,1% (Bernal *et al.*, 1974: 101).

En una muestra de estudiantes extranjeros en México se evidencia mayor frecuencia de esquemas (41,1%) que en personas con ascendientes mexicanos (18,8%) con diferencias de valor significativo para ambos sexos (González *et al.*, 1995: 269).

En esta área palmar del Th/I (Tabla 7) el grupo Coyaima (17,6%) presenta mayor frecuencia de figuras que Bogotá (1,1%), con diferencias significativas tanto a nivel grupal

como sexual (Tabla 12). Los indígenas americanos, especialmente los de Suramérica observan las mayores frecuencias (41%), con un 28% en Suramérica; son muy bajas en Europa (1,1-17,7%) y en Asia (0,8-20%). En la muestra de Bogotá de Vargas y Burgos (1988: 55) su frecuencia es muy baja (6,0%) al igual que en escolares con 5,0% (Bernal *et al.*, 1974: 101). En estudiantes de México con ascendientes extranjeros se aprecia menor frecuencia de esquemas (14,6%) que en personas con ascendientes mexicanos (27,3%) con diferencias de valor significativo ( $F < 0,01$ ) para mujeres (González *et al.*, 1995: 269).

El área interdigital II no manifiesta mayores diferencias, ni a nivel grupal, sexual ni en lateralidad, pues su frecuencia es muy baja en el ámbito mundial (menor del 10%). Esta variable no tiene peso diferenciador por lo que no se recomienda su inclusión en los análisis estadísticos.

El área interdigital III (Tabla 8) es una de las variables más diferenciadoras, tanto a nivel grupal, sexual como en lateralidad (Tabla 12); la muestra de Coyaima (31%) pre-

**Tabla 6.** Distribución del patrón del área palmar Hy

| COYAIMA |      |     |      | BOGOTÁ |      |      |      |
|---------|------|-----|------|--------|------|------|------|
| F       |      | M   |      | F      |      | M    |      |
| I       | D    | I   | D    | I      | D    | I    | D    |
| 27,6    | 14,3 | 9,7 | 12,9 | 11,7   | 11,0 | 15,5 | 10,3 |

**Tabla 7.** Distribución del patrón del área palmar Th/I

| COYAIMA |      |      |      | BOGOTÁ |     |   |     |
|---------|------|------|------|--------|-----|---|-----|
| F       |      | M    |      | F      |     | M |     |
| I       | D    | I    | D    | I      | D   | I | D   |
| 17,2    | 14,3 | 19,4 | 19,4 | 1,8    | 0,9 | 0 | 1,7 |

**Tabla 8.** Distribución del patrón del área interdigital III

| COYAIMA |      |      |      | BOGOTÁ |      |      |     |
|---------|------|------|------|--------|------|------|-----|
| F       |      | M    |      | F      |      | M    |     |
| I       | D    | I    | D    | I      | D    | I    | D   |
| 27,6    | 28,6 | 32,3 | 35,5 | 24,3   | 39,7 | 11,0 | 6,9 |

<sup>1</sup> Es probable que existan problemas metodológicos en la observación de la muestra aquí expuesta.

senta mayor frecuencia que Bogotá (20,5%). En Europa es alta (18,6-46,4%), al igual que en Asia Central (8,6-46,2%) y Septentrional (8,9-48,4%). En los indígenas de Norteamérica (30%) y Centroamérica (32%) tiene valores medios, pero son bajos en Suramérica (15%); en esta región los valores más altos corresponden a los Pewenche de Chile (30%) y Coyaima de Colombia. Mientras que las mujeres de Coyaima expresan menor frecuencia (28,1%) que los varones (35%), en Bogotá es lo contrario, con mujeres que evidencian mayor incidencia (32%) que en hombres (8,95%).

El grupo Coyaima (66,6%) en general, y particularmente el femenino (71,9%) manifiestan mayores frecuencias en el área interdigital IV (Tabla 9) que Bogotá (43%). La presencia de figuras en esta área interdigital es muy elevada en Centroamérica (70%) y Norteamérica (63%), un poco menor en Suramérica (59%). Las diferencias son significativas a nivel grupal pero no en el ámbito sexual ni en lateralidad.

En general, las configuraciones palmares son más frecuentes en los indígenas de Coyaima que en Bogotá.

Excluyendo el patrón digital del pulgar (dedo I) que expresa diferencias significativas entre grupos y sexos, pero no en lateralidad, los otros dedos no son muy informativos (Tablas 10, 11, 12). Aquí los indígenas (72%) se caracterizan por mayores frecuencias de torbellinos en este dedo que los mestizos de Bogotá (44,7%; 42,2%; 42,3%) y Cali (36,9%), especialmente los varones. En cuanto a los patrones digitales, las cuatro muestras de Bogotá y Cali se aproximan a las españolas, que en general se caracterizan por mayor presencia de presillas (65%) en todos los dedos, siendo en mujeres sanabresas de 58,6% y en varones de 62,7% en el dedo pulgar (Álvarez *et al.*, 1987: 276). En mestizos mexicanos es de 60,1% (López 1995: 278).

#### 5.4. Análisis intergrupar

Con el fin de establecer las similitudes entre las muestras colombianas y otros grupos poblacionales, se aplicó un análisis de clasificación mediante conglomerados jerárquicos, aplicando el método de Ward, la medida de distan-

**Tabla 9.** Distribución del patrón del área interdigital IV

| COYAIMA |      |      |      | BOGOTÁ |      |      |      |
|---------|------|------|------|--------|------|------|------|
| F       |      | M    |      | F      |      | M    |      |
| I       | D    | I    | D    | I      | D    | I    | D    |
| 75,9    | 67,9 | 61,3 | 61,3 | 43,2   | 49,5 | 36,2 | 43,1 |

**Tabla 10.** Distribución de los patrones digitales del grupo Coyaima por sexo y lado

| Dedo | I |     |      | II   |      |      | III  |      |      | IV   |      |      | V    |      |      |      |
|------|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | A | L   | W    | A    | L    | W    | A    | L    | W    | A    | L    | W    | A    | L    | W    |      |
| F    | I | 3,4 | 34,5 | 62,1 | 20,7 | 58,6 | 20,7 | 17,2 | 72,4 | 10,3 | 3,4  | 55,2 | 41,4 | 3,4  | 82,8 | 13,8 |
|      | D | 3,6 | 28,6 | 67,9 | 7,1  | 60,7 | 32,1 | 10,7 | 78,6 | 10,7 | 14,3 | 64,3 | 21,4 | 14,3 | 75,0 | 10,7 |
| M    | I | 3,2 | 16,1 | 80,6 | 16,1 | 67,7 | 32,1 | 6,5  | 83,9 | 9,7  | 6,5  | 48,4 | 45,2 | 6,5  | 80,6 | 12,9 |
|      | D | 0   | 22,6 | 77,4 | 19,4 | 64,5 | 16,1 | 9,7  | 77,4 | 12,9 | 6,5  | 45,2 | 48,4 | 6,5  | 80,6 | 12,9 |

**Tabla 11.** Distribución de los patrones digitales del grupo Bogotá por sexo y lado

| Dedo | I |     |      | II   |      |      | III  |      |      | IV   |     |      | V    |     |      |     |
|------|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|-----|
|      | A | L   | W    | A    | L    | W    | A    | L    | W    | A    | L   | W    | A    | L   | W    |     |
| F    | I | 7,2 | 49,5 | 43,2 | 17,1 | 53,2 | 29,7 | 11,7 | 78,4 | 9,9  | 4,5 | 56,8 | 38,7 | 0,9 | 92,8 | 6,3 |
|      | D | 9,2 | 56,9 | 33,9 | 18,3 | 55,0 | 26,6 | 15,6 | 67,9 | 16,5 | 6,4 | 60,6 | 33,0 | 0,9 | 92,7 | 6,4 |
| M    | I | 3,4 | 46,6 | 50,0 | 29,3 | 41,4 | 29,3 | 8,6  | 75,9 | 15,5 | 0   | 58,6 | 41,4 | 0   | 91,4 | 8,6 |
|      | D | 5,2 | 43,1 | 51,7 | 15,5 | 60,3 | 24,1 | 10,3 | 74,1 | 15,5 | 1,7 | 75,9 | 22,4 | 1,7 | 91,4 | 6,9 |

**Tabla 12.** Prueba Kolmogorov-Smirnov Z entre los grupos Coyaima y Bogotá

| Kolmogorov-Smirnov Z | Línea D | Línea C | Línea B | Línea A | Delta t | Área Hy | Área Th/I |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|
| Dif. absoluta        | 0,145   | 0,130   | 0,307   | 0,087   | 0,076   | 0,139   | 0,182     |
| Dif. Positiva        | 0,042   | 0,130   | 0,015   | 0,016   | 0,076   | 0,139   | 0,182     |
| Dif. Negativa        | -0,145  | -0,006  | -0,307  | -0,087  | -0,002  | -0,003  | 0,00      |
| Z                    | 1,356   | 1,218   | 2,879   | 0,812   | 0,711   | 0,432   | 2,409     |
| Signif. Asint.       | 0,051   | 0,103   | 0,00    | 0,524   | 0,693   | 0,992   | 0,000     |

| Kolmogorov-Smirnov Z | Área II | Área III | Área IV | Dedo I | Dedo II | Dedo III | Dedo IV | Dedo V |
|----------------------|---------|----------|---------|--------|---------|----------|---------|--------|
| Dif. absoluta        | 0,012   | 0,114    | 0,223   | 0,294  | 0,067   | 0,031    | 0,050   | 0,067  |
| Dif. Positiva        | 0,00    | 0,114    | 0,223   | 0,294  | 0,034   | 0,013    | 0,013   | 0,058  |
| Dif. Negativa        | -0,012  | 0,00     | -0,003  | 0,00   | -0,067  | -0,031   | -0,031  | -0,067 |
| Z                    | 0,112   | 1,073    | 2,094   | 2,757  | 0,625   | 0,287    | 0,287   | 0,625  |
| Signif. Asint.       | 1,00    | 0,200    | 0,00    | 0,00   | 0,829   | 1,00     | 1,00    | 0,829  |

cias euclídeas al cuadrado. Las variables empleadas fueron las líneas modales D (main line index), C (ausencia), la frecuencia de configuraciones digitales totales (torbellinos, presillas, arcos), el índice PII (suma de deltas digitales), las áreas interdigitales Hy, Th/I, II, III, IV.

Las muestras comparadas (ambos sexos combinados) en la prueba de clasificación provienen de indígenas de Norteamérica (Esquimal de Wainwright, Cherokee, Apache, Navajo, Pueblo), Centroamérica (Maya de Yucatán y Guatemala, no Maya de Mixteca, Tarahumara, Zapoteca), Suramérica (Andino de Aymará, Quechua, Chipaya, no Andino de Cashinahua, Pewenche, Yanomama) (Cásarez, 1982; Coyoc, 1997; Garruto *et al.*, 1979; Gurri *et al.*, 1995; Hoff *et al.*, 1981; Murillo *et al.*, 1977; Rothhammer *et al.*, 1973; Serrano, 1982); caucasoides de España (Vascos, Canarios, Asturianos, Barcelona) (Álvarez *et al.*, 1984); mestizos de México (González *et al.*, 1995; López, 1995); mestizos de Argentina (Córdoba, Salsacate, Chancan, Parroquia) (Demarchi *et al.*, 1996); nativos de Siberia y Urales de Rusia (Mansi, Janti, Keti, Yakut, Ulchi) (Heet, 1983) (Tabla 13).

Infortunadamente para las muestras españolas, argentinas y México D. F. no disponemos de información sobre su variación palmar, solamente de la digital, por lo que los valores perdidos se reemplazaron con la media de todas las poblaciones.

El primer conglomerado está integrado por españoles, mestizos y Coyaima, con distancias menores a 0,400, en

donde las muestras colombianas de Bogotá y Cali están muy próximas entre sí (F=0,200), y un poco más distanciadas de las españolas y Coyaima (F=0,350). De los grupos mestizos el de Argentina está más cercano a los españoles, y de Colombia el de Cali. El segundo conglomerado está integrado por los suramericanos andinos Quechua, y los amazónicos Yanomama, Cashinahua y Pewenche. La población del suroeste de Estados Unidos se aproxima a la noroeste de México (Apache, Navajo, Pueblo, Tarahumara) en un solo enjambre. Centroamérica (Mixteca, Chiapas, Guatemala, Yucatán) se aglomera con las norteamericanas (Esquimal, Cherokee) y dos andinas (Aymará, Chipaya). Las muestras siberianas están muy próximas entre sí pero muy distanciadas del resto de América (Fig. 5).

Estas distancias estarían señalando que el grupo indígena de Coyaima está muy mestizado con grupos hispano-colombianos, al igual que Bogotá y Cali (cf Rodríguez, 2004). Igualmente estarían reflejando problemas metodológicos pues, infortunadamente, los datos de los patrones palmares no son los originales sino que corresponden a los promedios intergrupales.

En el ámbito de los indígenas suramericanos llama la atención que los andinos y amazónicos observan mucha afinidad entre sí, y en Norteamérica se aprecia mucha homogeneidad entre los nativos del suroeste.

Los aborígenes siberianos representan un grupo muy homogéneo y conserva todavía cierta proximidad biológi-

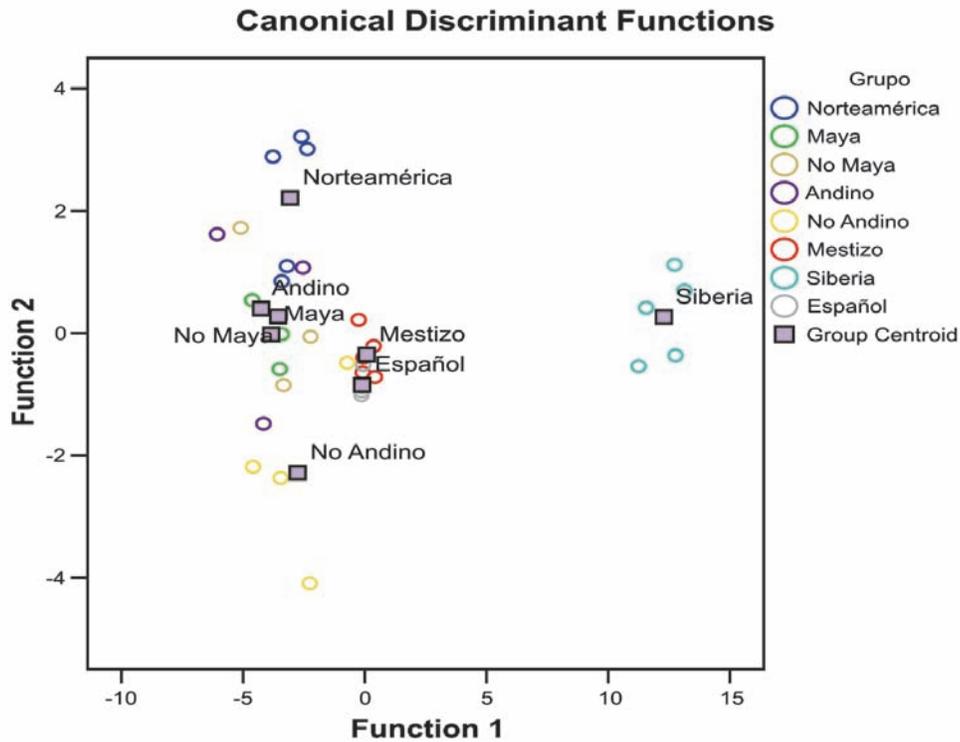


Figura 4. Diagrama de funciones canónicas discriminantes por grupos regionales.

Tabla 13. Matriz de estructura discriminante

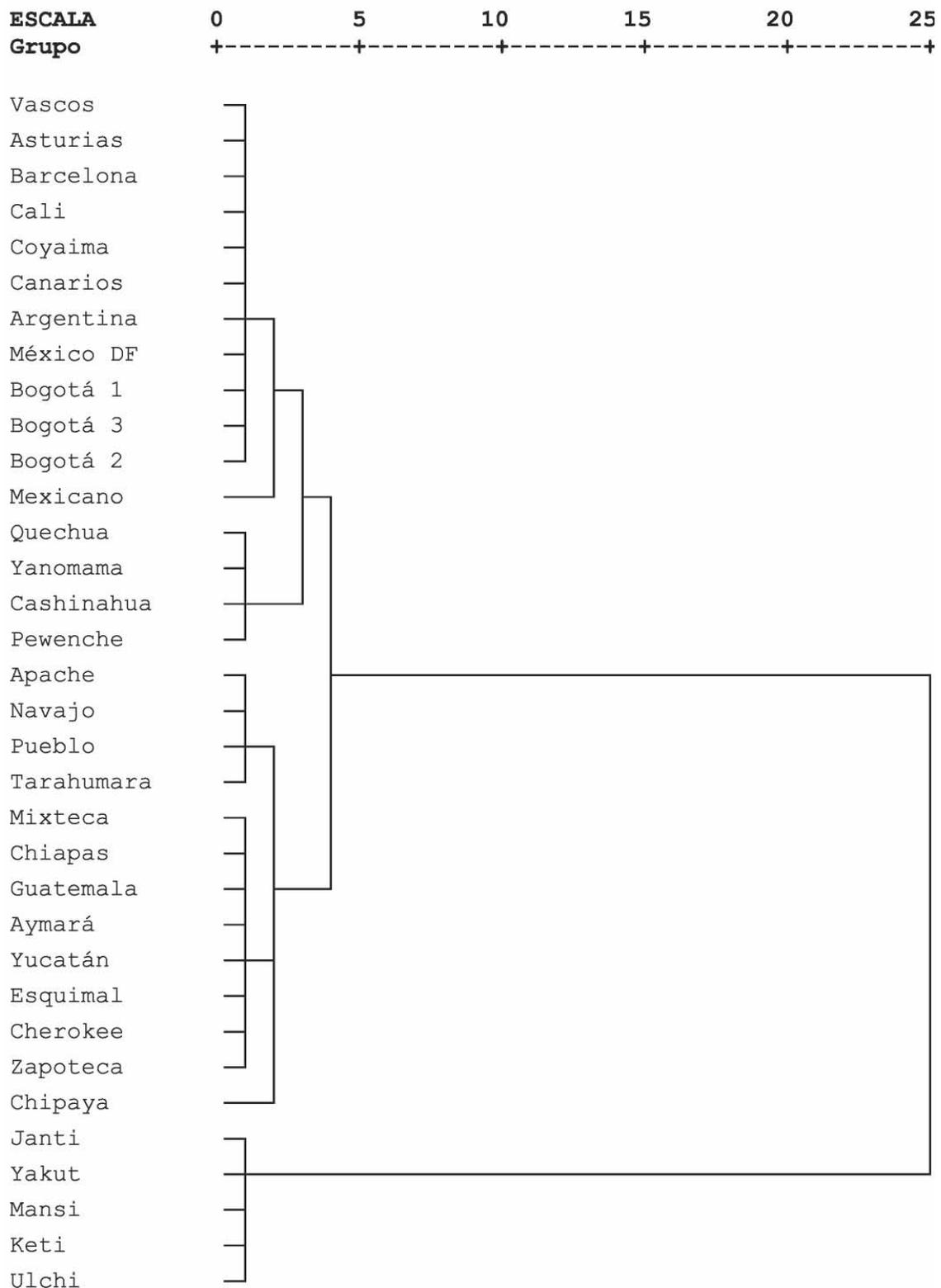
|              | Función |         |         |
|--------------|---------|---------|---------|
|              | 1       | 2       | 3       |
| Imain D      | 0,992*  | -0,120  | -0,029  |
| Inter III ** | 0,481*  | 0,090   | -0,107  |
| Hy **        | 0,236*  | -0,105  | -0,148  |
| Inter. II ** | 0,035   | -0,470* | -0,273  |
| Inter. IV ** | -0,204  | 0,441*  | 0,405   |
| Digiarco **  | 0,117   | -0,404* | -0,212  |
| ThI          | -0,120  | -0,356  | 0,927*  |
| Digitorb **  | 0,133   | 0,556   | 0,733*  |
| IIP          | 0,101   | 0,680   | 0,726*  |
| Digipres **  | -0,176  | -0,403  | -0,652* |
| D11 **       | -0,224  | -0,040  | -0,268* |
| Causen **    | 0,035   | -0,071  | 0,124*  |

\* Mayor correlación absoluta entre cada variable y cualquier función discriminante  
 \*\* Variable no empleada

ca con los indígenas americanos, pero mayor aún con los grupos latinoamericanos mestizos y los caucosoides hispánicos (Fig. 4).

Con el propósito de establecer qué variables entre todas son las más valiosas para diferenciar grupos regionales, si una serie de variables se desempeña igualmente tan bien como otras, qué grupos son más diferentes y qué casos son marcadamente disímiles (Shennan, 1992), se aplicó un análisis multivariado discriminante con los grupos regionales Norteamérica, Mayas, No Mayas, Andinos, No Andinos, Mestizos, Españoles y Siberia.

Según el análisis discriminante las variables más útiles en la diferenciación grupal regional son el índice de la línea D, el área Th/I y el índice de intensidad patrón digital (IIP) (Tabla 13). El grupo más disímil es el de Siberia (Rusia) (Fig. 4; Tabla 14); los más próximos son el Mestizo e Hispano cuyas diferencias no son significativas, al igual que el Maya y No Maya, Norteamérica y No Maya, Andino y Maya. Los grupos geográficos Andino, Maya y No Maya conforman un enjambre muy cercano entre sí; los no Andinos se diferencian un poco más (Fig. 4).



**Figura 5.** Dendrograma de distancias dermatoglíficas reescaladas y combinadas mediante el método de Ward y la distancia euclídea.

Tabla 14. Comparación por pares de grupos mediante la distancia Mahalanobis

| Grupo        |     | Norteamérica | Maya    | No Maya | Andino  | No Andino | Mestizo | Siberia | Español |
|--------------|-----|--------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|
| Norteamérica | F   |              | .585    | .185    | 1,743   | 1,570     | 29,401  | 596,796 | 24,121  |
|              | Sig |              | .452    | .671    | .199    | .222      | .000    | .000    | .000    |
| Maya         | F   | .595         |         | .089    | .247    | 3,355     | 29,818  | 480,542 | 25,452  |
|              | Sig | .452         |         | .768    | .627    | .079      | .000    | .000    | .000    |
| No Maya      | F   | .185         | .089    |         | .633    | 2,287     | 26,280  | 466,001 | 22,329  |
|              | Sig | .671         | .768    |         | .434    | .144      | .000    | .000    | .000    |
| Andino       | F   | 1,743        | .247    | .633    |         | 5,583     | 36,192  | 505,201 | 31,092  |
|              | Sig | .199         | .624    | .434    |         | .027      | .000    | .000    | .000    |
| No Andino    | F   | 1,570        | 3,355   | 2,287   | 5,583   |           | 14,894  | 474,341 | 12,046  |
|              | Sig | .222         | .079    | .144    | .027    |           | .001    | .000    | .002    |
| Mestizo      | F   | 29,401       | 29,818  | 26,280  | 36,192  | 14,894    |         | 361,272 | .040    |
|              | Sig | .000         | .000    | .000    | .000    | .001      |         | .000    | .843    |
| Siberia      | F   | 596,796      | 480,542 | 466,001 | 505,201 | 474,341   | 361,272 |         | 328,367 |
|              | Sig | .000         | .000    | .000    | .000    | .000      | .000    |         | .000    |
| Español      | F   | 24,121       | 25,452  | 22,329  | 31,092  | 12,046    | .040    | 328,367 |         |
|              | Sig | .000         | .000    | .000    | .000    | .002      | .843    | .000    |         |

## 6. Conclusiones

Como se puede apreciar del presente reporte de poblaciones colombianas, los rasgos dermatoglíficos son muy útiles en los procesos de identificación y diferenciación de grupos geográficos de distintos orígenes, especialmente entre indígenas, mestizos y caucasoides. Los rasgos más discriminadores son los palmares, especialmente las configuraciones de las líneas modales D, C, B, A, el trirradio axial t, las áreas interdigitales hypothenar, thenar y áreas I, III y IV; de los patrones digitales solamente el dedo pulgar (I) es útil para diferenciar grupos poblacionales. De las líneas modales la C y A son adecuadas para diferenciar sexo, además de las áreas palmares Th/I y III, y el dedo pulgar (I). El área interdigital II y los dedos II, III, IV y V no son muy útiles en los estudios intra-interpoblacionales.

Los indígenas de Coyaima se caracterizan por presentar mayor cantidad de configuraciones —especialmente presillas— en las áreas Hy, Th/I, III y IV, terminaciones de las líneas modales D en áreas 7 y 9; B en 5'; A en 4; C en 5 y 7. En el dedo pulgar (I) expresan mayor frecuencia de torbellinos, especialmente los varones. A juzgar por su similitud dermatoglífica con los grupos de Bogotá, Cali y de España, en el transcurso de los últimos años han sido sometidos

a procesos de miscegenación. Por su parte, los grupos bogotanos observan menor frecuencia de los rasgos mencionados, y en el dedo pulgar mayor frecuencia de presillas, especialmente las mujeres. En los patrones del trirradio axial no hay diferencias pues en todos los grupos se presenta el t, con muy baja frecuencia de t' y t''.

En el ámbito de la discusión sobre la variación poblacional de los indígenas americanos se aprecia una dicotomía entre los norteamericanos y centro-suramericanos, incluyendo dentro de los centroamericanos los grupos Apache, Navajo, Pueblo y Tarahumara. Se aprecia afinidad entre indígenas mayas y no mayas en Centroamérica, y entre andinos y amazónicos en Suramérica, reflejando consecuencias de flujo génico entre esas regiones y el hecho de compartir un tronco ancestral antiguo.

La alta frecuencia de torbellinos en las impresiones dactilares, considerada como indicador del componente indígena (Serrano, 1982: 161; López, 1995: 281), se aprecia mejor en el dedo pulgar. Por otro lado, la idea de que porcentajes menores para la región Th/I y mayores para Hy es una característica de las poblaciones españolas y europeas (Coyoc, 1997: 247) no parece corroborarse en este estudio. Por esta razón, para analizar la dinámica de la miscegenación poblacional, se recomienda metodológicamente incluir las variables diferenciadoras como las

líneas principales (D, C, B, A), las áreas interdigitales (Hy, Th, I, III, IV) y de las digitales el dedo pulgar (I) para obtener mejores resultados en los estudios intra-interpoblacionales. Sin embargo, es probable que los resultados no

sean universales debido a la amplia variación existente entre las poblaciones humanas, y que la utilidad discriminadora de las variables dermatoglíficas dependa de la especificidad de cada grupo (Coyoc, 1997: 248).

**Tabla 15.** Frecuencia de rasgos dermatoglíficos de diferentes poblaciones mundiales.

| Población      | Torbellinos | Presillas | Arcos | PII  | Main Line Index D | D 11 | C ausente | Hy   | Th1  | II   | III  | IV   |
|----------------|-------------|-----------|-------|------|-------------------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| Esquimales M   | 0,28        | 0,70      | 0,03  | 12,5 |                   | 0,33 | 0,10      | 0,20 | 0,11 | 0,07 | 0,30 | 0,48 |
| Esquimales F   | 0,22        | 0,72      | 0,06  | 11,6 |                   | 0,40 | 0,11      | 0,28 | 0,03 | 0,02 | 0,23 | 0,55 |
| Apache M       | 0,49        | 0,45      | 0,05  | 14,4 | 7,56              |      | 0,27      | 0,13 | 0,18 | 0,02 | 0,28 | 0,60 |
| Apache F       | 0,51        | 0,45      | 0,04  | 14,7 | 7,49              |      | 0,25      | 0,19 | 0,08 | 0,00 | 0,31 | 0,62 |
| Cherokee M     | 0,32        | 0,63      | 0,05  | 12,6 | 7,44              |      | 0,12      | 0,06 | 0,10 | 0,04 | 0,40 | 0,53 |
| Cherokee F     | 0,31        | 0,63      | 0,06  | 12,6 | 7,32              |      | 0,12      | 0,07 | 0,13 | 0,01 | 0,28 | 0,64 |
| Navajo M       | 0,48        | 0,49      | 0,03  | 14,5 | 7,58              |      | 0,21      | 0,13 | 0,15 | 0,0  | 0,32 | 0,47 |
| Navajo F       | 0,52        | 0,43      | 0,05  | 14,6 | 7,70              |      | 0,25      | 0,07 | 0,16 | 0,0  | 0,39 | 0,55 |
| Pueblo         | 0,53        | 0,40      | 0,07  | 14,6 | 6,99              |      | 0,11      | 0,13 | 0,21 | 0,02 | 0,21 | 0,80 |
| Mixtecas       | 0,40        | 0,57      | 0,03  | 13,7 | 7,37              | 0,15 | 0,18      | 0,08 | 0,50 | 0,05 | 0,27 | 0,63 |
| Tarahumaras    | 0,52        | 0,45      | 0,03  | 14,9 | 6,42              | 0,27 | 0,02      | 0,15 | 0,42 | 0,0  | 0,31 | 0,77 |
| Zapotecas      | 0,34        | 0,59      | 0,07  | 12,8 | 7,87              | 0,27 | 0,07      | 0,23 | 0,25 | 0,04 | 0,48 | 0,69 |
| Yucatán        | 0,40        | 0,55      | 0,05  | 13,5 | 6,72              |      | 0,08      | 0,09 | 0,34 | 0,05 | 0,24 | 0,59 |
| Chiapas        | 0,43        | 0,53      | 0,05  | 13,8 | 7,30              |      | 0,11      | 0,14 | 0,42 | 0,0  | 0,23 | 0,63 |
| Guatemala      | 0,38        | 0,56      | 0,06  | 13,2 | 7,30              |      | 0,11      | 0,11 | 0,40 | 0,0  | 0,27 | 0,73 |
| Aymará M       | 0,43        | 0,54      | 0,03  | 14,0 | 7,58              |      | 0,17      | 0,24 | 0,25 | 0,0  | 0,16 | 0,66 |
| Aymará F       | 0,35        | 0,57      | 0,08  | 12,8 | 7,75              |      | 0,17      | 0,24 | 0,18 | 0,0  | 0,22 | 0,57 |
| Chipaya M      | 0,33        | 0,65      | 0,02  | 13,1 | 5,87              |      | 0,15      | 0,08 | 0,19 | 0,0  | 0,14 | 0,79 |
| Chipaya F      | 0,34        | 0,66      | 0,0   | 13,4 | 6,16              |      | 0,16      | 0,11 | 0,22 | 0,0  | 0,09 | 0,78 |
| Quechua M      | 0,33        | 0,56      | 0,11  | 11,1 | 7,10              | 0,22 | 0,19      | 0,10 | 0,22 | 0,04 | 0,10 | 0,51 |
| Quechua F      | 0,29        | 0,57      | 0,14  | 11,3 | 7,05              | 0,24 | 0,14      | 0,15 | 0,23 | 0,0  | 0,06 | 0,53 |
| Cashinahua M   | 0,18        | 0,74      | 0,08  | 11,3 | 7,57              | 0,25 | 0,17      | 0,09 | 0,28 | 0,0  | 0,08 | 0,45 |
| Cashinahua F   | 0,11        | 0,77      | 0,12  | 10,2 | 7,33              | 0,23 | 0,22      | 0,04 | 0,21 | 0,0  | 0,09 | 0,54 |
| Yanomama M     | 0,26        | 0,65      | 0,09  | 11,6 | 7,10              |      | 0,21      | 0,17 | 0,19 | 0,0  | 0,15 | 0,69 |
| Yanomama F     | 0,23        | 0,59      | 0,18  | 10,5 | 6,72              |      | 0,23      | 0,13 | 0,40 | 0,0  | 0,17 | 0,63 |
| Pewenche M     | 0,26        | 0,64      | 0,10  | 11,6 | 7,97              |      | 0,22      | 0,26 | 0,43 | 0,0  | 0,27 | 0,51 |
| Pewenche F     | 0,26        | 0,57      | 0,17  | 10,9 | 8,16              |      | 0,22      | 0,25 | 0,55 | 0,01 | 0,32 | 0,43 |
| Coyaimas       | 0,31        | 0,60      | 0,09  | 12,2 | 8,60              | 0,14 | 0,09      | 0,16 | 0,18 | 0,0  | 0,31 | 0,66 |
| Bogotá 1       | 0,26        | 0,66      | 0,08  | 11,8 | 9,16              | 0,25 | 0,10      | 0,12 | 0,01 | 0,0  | 0,20 | 0,57 |
| Bogotá 2       | 0,23        | 0,72      | 0,04  | 11,8 |                   |      |           | 0,30 | 0,06 | 0,02 | 0,39 | 0,55 |
| Cali           | 0,28        | 0,64      | 0,08  | 12,0 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Mexicanos      | 0,42        | 0,54      | 0,05  | 13,8 |                   |      | 0,15      | 0,12 | 0,41 | 0,01 | 0,23 | 0,69 |
| México D. F. M | 0,35        | 0,57      | 0,08  | 12,7 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| México D.F. F  | 0,32        | 0,63      | 0,05  | 12,2 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Argentina F    | 0,31        | 0,64      | 0,06  | 12,5 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Argentina M    | 0,32        | 0,61      | 0,07  | 12,5 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Vascos M       | 0,30        | 0,62      | 0,05  | 12,2 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Vascos F       | 0,29        | 0,66      | 0,07  | 12,4 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Canarios       | 0,32        | 0,62      | 0,07  | 12,6 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Asturianos     | 0,31        | 0,64      | 0,05  | 12,6 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Asturianas     | 0,27        | 0,65      | 0,08  | 11,9 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Barcelona M    | 0,28        | 0,67      | 0,05  | 12,3 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Barcelona F    | 0,27        | 0,66      | 0,08  | 12,0 |                   |      |           |      |      |      |      |      |
| Mansi          | 0,43        | 0,56      | 0,01  | 14,2 | 14,2              | 0,42 | 0,07      | 0,32 | 0,08 | 0,10 | 0,34 | 0,42 |
| Janti          | 0,50        | 0,46      | 0,04  | 14,6 | 14,7              | 0,36 | 0,07      | 0,23 | 0,03 | 0,03 | 0,26 | 0,46 |
| Keti           | 0,43        | 0,56      | 0,01  | 14,1 | 14,1              | 0,34 | 0,08      | 0,26 | 0,18 | 0,05 | 0,29 | 0,52 |
| Yakutos        | 0,50        | 0,49      | 0,01  | 14,9 | 14,9              | 0,43 | 0,04      | 0,18 | 0,11 | 0,03 | 0,28 | 0,54 |
| Ulchi          | 0,42        | 0,53      | 0,05  | 13,8 | 14,8              | 0,22 | 0,04      | 0,21 | 0,08 | 0,08 | 0,16 | 0,44 |

## Bibliografía

- Álvarez M., L. Caro, H. Rodríguez.** 1987. Los dermatoglifos digitales en el noroeste de España. México, UNAM *Estudios de Antropología Biológica* 3: 267-289.
- Antón B., F., J. V. De Luis y Turégano.** 1998. *Policía Judicial*. Volumen I. Valencia, Ciencia Policial.
- Babler W. J.** 1978. Prenatal Selection and Dermatoglyphic Patterns. *Amer. J. Physical Anthropology* 48(1): 21-28.
- Bernal J. E., L. I. Becerra, F. Garnica, R. Giraldo, E. Moncaleano, C. M. Quintero.** 1974. Patrón normal de dermatoglifos para la ciudad de Bogotá. *Universitas Médica* 16: 87-103.
- Cásarez M.** 1984. Patrones dermatoglíficos cuantitativos en Huicholes de San Andrés Cohamiata, Jalisco. México, UNAM *Estudios de Antropología Biológica* 2: 209-219.
- Chakraborty R.** 1991. The Role of Heredity and Environment on Dermatoglyphic Traits. In: *Dermatoglyphics: Science in Transition*, C. C. Plato, R. M. Garruto, B. A. Schaumann eds. New York, Wiley-Liss, pp. 151-191.
- Contreras N., G. M. García, G. Gomar.** 1995. Análisis dermatoglífico en estudiantes universitarios con ascendientes mexicanos y extranjeros. México, UNAM *Estudios de Antropología Biológica* 5: 265-300.
- Coyoc M. A.** 1997. Análisis dermatoglífico en diversas muestras de población indígena del área Maya. México, UNAM *Estudios de Antropología Biológica* 7: 235-252.
- Cummins H., C. Midlo.** 1961. *Finger prints, palms and soles. An introduction to dermatoglyphics*. New York, Dover Publications, Inc.
- De la Cruz J. A.** 1984. Patrón dermatoglífico de estudiantes en Cali. *Colombia Médica* 15(3):123-133.
- Demarchi D. A., A. J. Marcellino.** 1996. El uso de dermatoglifos en la discriminación interpoblacional. *Revista Argentina de Antropología Biológica* 1(1): 246-258.
- Forero E.** 1988. Estudio de dermatoglifos en estudiantes de Antropología. Bogotá, *Revista de Estudiantes de Arqueología* No. 4.
- Garruto R. M., C. C. Plato, C. J. Hoff, M. T. Newman, D. C. Gajdusek.** 1979. Characterization and Distribution of Dermatoglyphic Features in Eskimo and North, Central, and South American Indian Populations. *Birth Defects Original Article Series* 15(6): 277-334.
- Garruto R. M., C. C. Plato.** 1991. Fingerprints, Palms, and Soles: Historical Transitions. In: *Dermatoglyphics: Science in Transition*, C. C. Plato, R. M. Garruto, B. A. Schaumann eds. New York, Wiley-Liss, pp. 7-18.
- Gurri F., Murguía, F. Dickinson, D. Cervera, R. M. Méndez.** 1995. Variación dermatoglífica en poblaciones mayas de Chiapas y Yucatán. México, UNAM *Estudios de Antropología Biológica* 5: 265-300.
- Heet H. L.** 1983. *Dermatoglífica de los pueblos de la Unión Soviética*. Moscú, Nauka (en ruso).
- Hoff C., C. C. Plato, R. M. Garruto, J. Dutt.** Dermatoglyphic Assessment of the Genetic Relationships of Native American. *Amer. J. Physical Anthropology* 55(4): 455-461.
- Jantz R. L., F. E. Johnston, G. F. Walker, K. M. Kensinger.** 1969. Finger Dermatoglyphics of the Peruvian Cashinahua. *Amer. J. Physical Anthropology* 30: 355-360.
- Larrauri S. et al.,** 1984. Dermatoglifos en una muestra de población venezolana. Caracas, *Acta Científica Venezolana* 35(3/4): 253-264.
- López S.** 1995. Datos dermatoglíficos de una muestra de población mestiza de la ciudad de México. México, UNAM *Estudios de Antropología Biológica* 5: 275-286.
- Malwala J., C. E. Parker, J. Melnyk.** 1969. Dermatoglyphics of the XYY Syndrome. *Amer. J. Physical Anthropology* 30: 209-214.
- Meier R. J.** 1991. Applications of Dermatoglyphics to Anthropologic Populations. In: *Dermatoglyphics: Science in Transition*, C. C. Plato, R. M. Garruto, B. A. Schaumann eds. New York, Wiley-Liss, pp. 253-265.
- Murillo F. F. Rothhammer, E. Llop.** 1977. The Chipaya of Bolivia: Dermatoglyphics and Ethnic Relationship. *Amer. J. Physical Anthropology* 46(1): 45-50.
- Penrose L. S.** 1968. Memorandum on Dermatoglyphic Nomenclature. *Birth Defects Original Article Series* 4(3):1-12.
- Reed T., R. Meier, J. Kilgariff.** 1990. *Taking Dermatoglyphic Prints. A Self-Instruction Manual*.
- Rodríguez J. V.** 1987. Algunos aspectos metodológicos-bioantropológicos relacionados con el poblamiento de América. Bogotá, *Maguaré*, revista Dpto. de Antropología Univ. Nacional de Colombia 5:9-40.
- Rodríguez J. V.** 2004. *La Antropología Forense en la identificación humana*. Bogotá, Dpto. de Antropología, Universidad Nacional de Colombia.
- Rojas D. L.** 2000. *Observaciones dermatoglíficas en dos poblaciones colombianas: indígenas de Coyaima y mestizos colombianos*. Bogotá, Carrera de Antropología, Universidad Nacional de Colombia.
- Rothhammer F., J. V. Neel, F. Rocha, G. Y. Sundling.** 1973. The Genetic Structure of a Tribal Population, the Yanomama Indians. VIII: Dermatoglyphic Differences Among Villages. *Amer. J. Genetics* 25: 152-166.
- Schaumann B. A., J. M. Opitz.** 1991. Clinical Aspects of Dermatoglyphics. In: *Dermatoglyphics: Science in Transition*, C. C. Plato, R. M. Garruto, B. A. Schaumann eds. New York, Wiley-Liss, pp. 193-228.
- Serrano C.** 1982. Dermatoglifos de Coras, Huicholes y mestizos de la Sierra de Nayarit, México. México, UNAM *Estudios de Antropología Biológica* 1: 155-162.
- Simón P.** 1981. *Noticias históricas de las conquistas de Tierra Firme en las Indias Occidentales*. Bogotá, Biblioteca Banco Popular.
- Vargas M. V., I. Bustos.** 1988. Dermatoglifos en una población colombiana. Bogotá, *Rev. Fac. Ciencias Universidad Javeriana* 1(3): 47-62.
- Wertelecki W.** 1991. Dermatoglyphic Investigation: Expanding Prospects. In: *Dermatoglyphics: Science in Transition*, C. C. Plato, R. M. Garruto, B. A. Schaumann eds. New York, Wiley-Liss, pp. 65-93.

Recibido: julio 16 de 2008.

Aceptado para su publicación: diciembre 3 de 2008.

## “CONSTRUCTION D’OBJET” ET OBJECTIVITÉ EN PHYSIQUE QUANTIQUE<sup>1</sup>

par

Michel Paty<sup>2</sup>

### Résumé

**Michel Paty:** “Construction d’objet” et objectivité en physique quantique. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33** (126): 61-77, 2009. ISSN 0370-3908.

Le domaine de la physique quantique ne peut être approché qu’indirectement, à l’aide de constructions abstraites de concepts; ces derniers sont organisés en une théorie cohérente et puissante, qui paraît correspondre à la “nécessité des phénomènes”, c’est-à-dire à quelque chose d’objectif. Dans l’“interprétation de la mécanique quantique”, cette objectivité (dans un sens général) est admise, mais ce à quoi elle renvoie fait problème: s’agit-il de phénomènes donnés dans leur observation ou d’objets physiques réels (dont il faudrait alors préciser dans quel sens on l’entend)? On examine si ce débat peut être articulé sur celui entre construction ou objectivité posé de nos jours à la philosophie de la connaissance par les études sociales sur les sciences. Un élément important d’appréciation est fourni par l’examen de la nature de la correspondance entre les concepts théoriques et ce qu’ils désignent: dans quelle mesure la représentation, d’abord abstraite, par construction, devient-elle ensuite “directe”, “concrète”, “intuitive”, selon la connaissance phénoménale elle-même à laquelle elle en vient à correspondre?

**Mots-clés:** Abstrait, Concept, Concret, Construction, Études sociales, Formalisme mathématique, Interprétation, Objectivité, Objet physique, Observation, Phénomènes, Philosophie de la connaissance, Physique quantique, Propriétés, Réductionnisme anthroposociologique, Réel, Représentation (abstraite, concrète, directe, intuitive), Théorie physique.

---

<sup>1</sup>Conferencia de posesión como miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, el 7 de noviembre de 2007.

<sup>2</sup>Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS et Université Paris 7–Denis Diderot. Université Paris 7–Denis Diderot, Centre Javelot. 2, place Jussieu – F-75251 Paris–Cedex 05. Tél. 33 (0)144278644 (secr.: 46) – FAX 33 (0) 144278647. Cour. él. (e-mail): michel.paty@univ-paris.diderot.fr

### Abstract

The domain of quantum physics can be attained at only indirectly, through abstract constructions of concepts; these last are organized into a coherent and powerful theory, that seems to correspond to the “necessity of the phenomena”, i.e to something objective. In the “interpretation of quantum mechanics”, objectivity (in a general sense) is admitted, but doubt is cast on to what it does refer: to phenomena given through their observation or to real physical objects (the meaning of which should be explicitly stated)? We examine whether this debate can be articulated with that between construction or objectivity set forth nowadays to philosophy of knowledge by the social studies of science. An important element of appreciation is provided by examining the nature of the correspondence between theoretical concepts and their signified: up to which degree does the theoretical representation, that is first by construction of an abstract character, become thereafter a “direct”, “concrete”, “intuitive” one, due to the phenomenal knowledge itself to which it comes to correspond?

**Key words:** Abstract, Concept, Concrete, Construction, Mathematical Formalism, Interpretation, Objectivity, Object (physical-), Observation, Phenomena, Philosophy of Knowledge, Physical Theory, Properties, Quantum Physics, Reductionism (anthropo-sociological-), Real, Representation (abstract -, concrete -, direct -, intuitive -, Social Studies).

### Resumen

La aproximación del dominio de la física cuántica solamente puede ser indirecta, con la ayuda de construcciones abstractas de conceptos; esos están organizados en una teoría coherente y potente, la cual parece corresponder a la “necesidad de los fenómenos” es decir a algo objetivo (en un sentido general). Según la “interpretación de la mecánica cuántica”, tal objetividad es admitida, pero su referencia (quiero decir: eso a lo cual ella se refiere) es problemática: ¿son fenómenos dados en su observación, o son objetos físicos reales (que deben explicitarse en algún)? Examinamos aquí si ese debate puede situarse con relación al debate entre construcción u objetividad tal como se propone hoy, frente a la filosofía del conocimiento, por los estudios sociales sobre las ciencias. Un elemento importante de apreciación es fornecido por el examen de la naturaleza de la correspondencia entre los conceptos teóricos y lo que ellos apuntan: ¿en qué medida la representación, inicialmente abstracta, por construcción, se transforma después en “directa”, “concreta”, “intuitiva”, según el propio conocimiento fenomenal a que ella llega a corresponder?

**Palabras clave:** Abstracto, Concepto, Concreto, Construcción, Estudios sociales, Fenomenos, Filosofia del conocimiento, Fisica cuantica, Formalismo matematico, Interpretación, Objetividad, Objeto fisico, Observación, Propiedades, Reduccionismo antropo-sociologico, Real, Representación (abstracta, concreta, directa, intuitiva), Teoria fisica.

## 1. Introduction

La physique quantique donne assez communément, au public, aux philosophes, mais aussi aux physiciens eux-mêmes, l'impression d'être construite de toutes pièces par la pensée, voire par des dispositifs expérimentaux, plutôt que donnée par la nature; ou, du moins, plutôt que de porter directement sur elle, comme on conçoit en général que le font les autres théories de la physique, plus classiques. En mécanique quantique, on parle de “préparation d'états”, de “théorie de la

mesure”, d'intervention irréductible de l'observateur sur l'objet observé, etc.; en physique des particules et des champs quantiques, on insiste sur le côté “artificiel” et l'apparence de jeux de construction (mathématique) des particules fondamentales à partir de théories de groupes de symétries, de nombres quantiques ou du concept de “jauge”. Ainsi des quarks avec leurs étranges propriétés de charges électriques et baryoniques non entières, leur “confinement”, leur “liberté asymptotique”, leurs “saveurs” et leurs “couleurs” . . . . À s'en tenir aux expressions, inventées par les physiciens pour les besoins

de la cause, il pourrait sembler à première vue que ces élaborations théoriques correspondent à un jeu formel plutôt qu'à la description des phénomènes de la nature et des propriétés objectives (de propriétés d'objets) qui s'imposeraient naturellement. Mais, en vérité, ces constructions ne sont pas gratuites, comme on peut en juger par les expériences effectuées dans ce domaine, qui révèlent ou créent des phénomènes qu'elles permettent d'analyser et de caractériser de manière circonstanciée et précise. La formulation des concepts mentionnés résulte de ces analyses, et les expériences correspondent en quelque sorte à des réponses de la nature aux questions qui lui sont posées dans ces termes.

En outre, des problèmes d'interprétation se sont longtemps manifestés, qui posaient la question du rapport entre le formel, sous-entendu, mathématique ("fonctions d'état" définies sur des espaces mathématiques de Hilbert, grandeurs "observables" comme "opérateurs hermitiens non commutatifs" opérant sur de tels espaces, etc.) et le physique, sous bénéfice de s'entendre sur ce que ce dernier qualificatif signifie exactement: l'empirique, le "donné aux sens", le mesurable, le naturel (physis), donné dans une relation, et laquelle? (pour ne pas dire crûment le réel, relatif à un certain domaine). Il est entendu, certes, que les phénomènes sont approchés "indirectement", ils sont incomplètement donnés par l'observation ou la mesure, ils sont déterminés de manière seulement probabiliste, etc.

Mentionnons, parmi d'autres problèmes d'interprétation, celui de la nature de la théorie et de son objet (ce dernier étant supposé décrit par celle-là); celui des propriétés assignables ou non à des systèmes physiques; l'éventualité de compléter la théorie par des "variables cachées" susceptibles de rétablir le déterminisme classique; la possibilité de concevoir ou de récuser la "non-localité" (plus précisément, la "non-séparabilité locale") pour des sous-systèmes corrélés; et encore, le raccordement entre le domaine quantique et le domaine classique, qui correspond à des objets et propriétés d'objets de conception plus directe . . .

Cependant, tous les concepts qui caractérisent les phénomènes quantiques s'organisent en une théorie cohérente et puissante, qui paraît bien correspondre à la "nécessité des phénomènes", en sorte qu'ils ne sont pas si éloignés que cela de l'objectivité. De quelle manière caractériserait-on le mieux la méthode d'accès à la connaissance de ce domaine de la physique: par construction, ou selon l'objectivité? Comment ces deux modes se concilient-ils, dans le travail des physiciens, et dans la

mise en oeuvre des résultats obtenus? Voire, qu'en est-il, pour les conceptions épistémologiques correspondantes, constructivisme ou objectivisme? Quelle est la place de la théorie et de l'expérience, respectivement, dans ces deux perspectives? Et, enfin, que peut-on dire de la nature de la théorie d'un tel domaine: est-elle fondamentalement mathématique, et appliquée, ou physique à proprement parler? (Il faut alors, d'ailleurs, préciser ce que l'on entend par ce dernier terme, c'est-à-dire la particularité de concepts, et de systèmes de concepts, physiques).

Notons encore que l'on peut distinguer deux types de propositions, en physique, qui peuvent se situer différemment l'une de l'autre par rapport au "constructivisme": celles qui se rapportent à des modèles théoriques, qui "collent aux phénomènes", comme on dit (c'est-à-dire qui tentent de les suivre dans les détails), et celles qui expriment avant tout des propriétés fondamentales, qui se rattachent à des traits structurels de ces phénomènes à travers leur représentation, et qui sont de portée plus générale (propriétés rassemblées, par exemple, dans la formulation de principes physiques, tels que des principes de symétrie et d'invariance).

Le résultat de l'élaboration théorique reçoit pour les deux modes de pensée (celui par modèles, et celui théorique proprement dit), un statut de vérité différent (partiel et pragmatique pour le premier, holiste et universalisant, voire plus normatif, pour le second). On peut aussi se demander si le critère de l'adéquation entre la représentation théorique et ce qui est représenté (l'"objet physique réel") suffit à épuiser la notion de vérité.

Ces jalons préliminaires étant posés - comme autant d'interrogations -, venons-en à la question qu'il s'agit ici d'éclairer, sur "l'objectivité et le constructivisme". J'y distingue, en ce qui concerne le domaine scientifique dont je veux parler (la physique, et plus particulièrement, la physique quantique), trois aspects, que j'aborderai successivement. Le premier aspect est celui de savoir si les concepts scientifiques (pour nous, ici, ceux de la physique, et plus particulièrement ceux de la physique quantique) correspondent à une réalité objective, ou à quoi que ce soit que l'on puisse qualifier d'objectif. Cet aspect correspond au débat "traditionnel" des physiciens et des philosophes sur l'interprétation en physique quantique, l'objet du débat étant, précisément, de qualifier ce "quoi que ce soit": réalité physique à proprement parler, ou entité mixte

“physico-observationnelle”? Cet aspect porte directement sur ce que l’on peut effectivement rencontrer dans la pratique intellectuelle de ce champ disciplinaire, quant à la forme et au contenu des connaissances et, en définitive, à leur signification.

Le second aspect concerne les processus par lesquels cette représentation est obtenue, que l’on peut rassembler sous le qualificatif de “construction”. C’est une construction non seulement intellectuelle, mais aussi sociale - et historiens et philosophes parlent dans ce sens, depuis quelques années, de “constructivisme”. La question posée de l’“objectivité” d’une telle construction ne coïncide pas nécessairement avec celle de la question précédente, qui s’en tenait aux formes et aux contenus. En prenant en considération les processus, les pratiques effectives et les contextes, on fait intervenir d’autres éclairages qui révèlent un certain degré au moins de contingence de ces contenus de connaissance élaborés et construits. Cette contingence fait, pour certains, s’évanouir la pertinence d’une référence trans-historique ou trans-sociale pour ces représentations supposées porter sur la nature: à cette aune, la science ne serait que le reflet de sa propre activité (essentiellement sociale) et ne nous dirait rien sur le monde. Les scientifiques (et d’autres avec eux, qui savent distinguer raisonnement et sophisme) admettront difficilement une position aussi extrême, qui ne fait pas de différence entre les divers genres d’activité humaine, sans considération pour les significations correspondantes. Leur bon sens - celui-là même qui accompagne leur propre pratique et intelligence de leur science - leur fait refuser à juste titre ce réductionnisme anthropo-sociologique qui ignore les contenus de sens.

Ces aberrations écartées, il reste cependant que les éléments de contingence dus aux circonstances socio-historiques de la production des connaissances ne sauraient être ignorés ou sous-estimés. Leur prise en compte et la réflexion sur eux constitue le troisième aspect de la question ici posée sur l’objectivité. Cet aspect porte sur la valeur même de la connaissance comme efforts et comme contenus. Nous nous demanderons, en particulier, dans quelle mesure l’on peut encore parler d’“objectivité” pour une construction de représentation d’un “objet naturel” supposé, et même, visé, mais dont les matériaux et les modalités seraient contingents par nature. Nous serons amenés à discuter du sens exact que l’on peut donner, pour la physique (parmi les sciences), à l’idée de “construction d’objectivité”, et dans quelle

mesure elle correspond à une “construction d’objets” qui ne soit pas factice et illusoire.

## 2. Les concepts scientifiques (physiques, quantiques) correspondent-ils à une objectivité?

Les concepts de la physique et, plus généralement, les concepts scientifiques, correspondent-ils à quelque chose d’objectif? c’est-à-dire (mais est-ce à dire?) à une réalité objective? Et, secondairement, de quelle manière se tiennent-ils dans cette correspondance: de manière d’abord abstraite, certes, ce que tout le monde admet, mais qui devient ensuite (ou non?) “directe”, “concrète”, “intuitive” ... C’est ce qui est en discussion.

Prenons, d’abord, “abstraite”. **Einstein** voyait dans la théorie de la relativité générale la marque d’un degré d’abstraction des concepts et des théories plus élevé qu’antérieurement, d’une distance qui irait sans cesse plus grande entre la représentation théorique et les données empiriques. Cette distance (conséquence logique au bout de la critique de l’induction, de **Hume** à **Mach** ou **Poincaré**) obligeait à faire acte de création.<sup>3</sup> Cependant, ces éléments initialement abstraits étaient ensuite l’objet d’une appropriation par la pensée, et devenaient par là, d’une certaine façon, concrets. Ce que **Paul Langevin**, qui voyait là une constante dans l’histoire des sciences, exprimait à sa manière en disant: “Le concret, c’est de l’abstrait rendu familier par l’usage”.<sup>4</sup> Est-ce également le cas avec la physique quantique? Nous y reviendrons.

Considérons, ensuite, “directe”. Je l’entends au sens d’un enserrement de la description théorique qui adhère au plus juste à ce qu’elle décrit. A moins que ce ne soit l’inverse? Dans le premier cas, c’est le “donné”, d’origine empirique (mais pas seulement), qui gouverne le mouvement de l’élaboration d’une description théorique. Tel fut, effectivement, l’un des moments de la constitution de la théorie quantique, lorsque les phénomènes de physique atomique et du rayonnement révélèrent des caractères qui échappaient à la théorie (classique) disponible. Ces caractères firent l’objet d’une organisation théorique systématique avec la formulation (vers 1926) de la mécanique ondulatoire et quantique, comme cadre conceptuel et théorique, et ses prolongements dans la dynamique avec la théorie de la diffusion et la théorie quantique des champs. Le succès de ces formulations théoriques leur était donné par leur cohérence et par la confirmation de leurs premières prédictions par

<sup>3</sup>Sur cette réflexion d’**Einstein** affirmée à de multiples reprises, voir **Paty** [1993a], chapitre 9.

<sup>4</sup>**Langevin** [1934].

l'expérience. C'était, alors, la description théorique qui adhérerait au plus près aux caractères non classiques des phénomènes qu'elle se proposait de décrire.

Mais ensuite vient le moment (sans cesse renouvelé) de la mise à l'épreuve de la théorie ainsi constituée, et c'est alors le second cas qui est effectif, celui de la proposition inverse à celle que nous venons d'illustrer, si ce qui est décrit (l'"objet" de la description) se révèle très ajusté et comme moulé à sa description par la théorie. On doit alors considérer que l'objet, tel qu'il est décrit, est en fait donné dans une représentation théorique préalable aux expériences par lesquelles on s'efforce de le circonscrire. Des phénomènes, initialement non connus et non prévus antérieurement, et même impensables selon les canons des connaissances précédentes, résultent, par la logique de la forme, de l'arrangement théorique. Ce dernier aura révélé, en structurant conceptuellement les traits spécifiques indiqués (en mettant en forme les relations de concepts comme des relations entre les grandeurs correspondantes, d'expression mathématique), que leur cohérence en profondeur impliquait les phénomènes ainsi prédits et ensuite constatés.

Dit de cette manière, cela paraît être un aspect général des théories physiques, et non pas seulement de la théorie quantique. Mais la théorie quantique l'illustre à un bien plus haut degré que toute autre théorie physique connue, car il est possible de dire à son propos, toutes choses égales par ailleurs, en prenant les mots à la lettre, que ce qui est décrit (dans un ordre caractérisé de phénomènes) adhère au plus juste à sa description par la théorie. Par exemple que des particules quantiques "interfèrent avec elles-mêmes" selon l'expression de **Dirac** (1930), qu'elles sont indiscernables de toute autre identique à elles et qu'elles obéissent (pour cette raison même) à la "statistique quantique", qu'elles sont non-séparables localement, que leur comportement est gouverné par le "principe de superposition linéaire" de leurs fonctions d'état, etc., tous caractères constatés mais qui n'auraient pu être conçus et pensés sans la théorie, qui y oblige.

Cela (l'enserrement de l'objet par la théorie) paraît donc être le cas en physique quantique plus encore qu'avec aucune autre description théorique d'"objets" par la physique: mais c'est aussi que de tels "objets", s'il en est, se révèlent en physique quantique sous des modalités quelque peu surprenantes pour le sens commun, même celui des scientifiques, habitué à d'autres comportements. Cela peut éventuellement se dire encore: ces "objets" ont des "propriétés" surprenantes.

En vérité, pas si surprenantes que cela, puisqu'on peut les déduire rationnellement par la théorie: c'est à nous, donc, de "faire avec", en explicitant leur signification, en tirant le fil de leur caractère intelligible dont la théorie précisément nous assure, au prix, comme nous le verrons, de transformations de notre "intuition commune". Mais ce sur quoi nous voulions insister avec le début de la phrase précédente, c'est sur l'expression "ces"objets" ont des "propriétés", fussent celles-ci à première vue surprenantes.

Nous allons le voir, toute la question épistémologique fondamentale sur la mécanique quantique se ramène à celle sur la nature d'un objet et de ses propriétés. Il y a donc bien relation étroite, et "directe" dans ce sens, illustré par la prédictivité, entre la description et ce qu'elle décrit, c'est-à-dire son "objet", dans le sens logique et non ontologique du terme. Ce sens de "direct" évacue la signification vague qui est souvent attachée à cet adjectif en termes d'images ou d'analogies de forme: mais déjà l'évolution des idées scientifiques avait permis de dénoncer le caractère illusoire des apparences premières.

Après ce développement sur la modalité "directe" (ou non) de la description théorique, nous devons ensuite nous demander s'il est possible (ou non) de qualifier celle-ci de "concrète", après le moment de l'abstraction. Je l'entends au sens de la correspondance à des effets tangibles, occasionnés ou produits par ces "objets" (ce mot étant encore pris ici dans le sens relativement neutre d'"objets de la représentation"). La réponse ne paraît pas faire de doute, si l'on pense à toutes les réalisations obtenues, avec accroissement des connaissances, dans tous les domaines de la physique où la théorie quantique constitue le cadre de pensée conceptuel. Et, en premier lieu, la réalisation phénoménale de la prédiction théorique est bien la marque du "concret". Ce qui est concret, c'est le monde des phénomènes, et particulièrement la production de phénomènes.

Enfin, cette théorie est-elle "intuitive", ou du moins est-il possible de la concevoir et de la pratiquer comme telle? J'entends, par intuitive, que l'on dispose, par elle, d'une pénétration intellectuelle synthétique du contenu de signification (au sens de la physique, c'est-à-dire de la conception des phénomènes physiques ou des "systèmes physiques" qui les engendrent) de ce "concept-objet", ou que l'on acquiert, progressivement, cette pénétration. La réponse, ici encore, se trouve dans la réalité effective du travail des physiciens, c'est-à-dire dans leur pratique de la pensée des phénomènes de ce champ

disciplinaire: une pensée qui se rend effective en termes de phénomènes, une pensée qui s'éprouve dans les phénomènes à travers l'expérience (la synthèse étant ici la pensée du phénomène, qui rassemble et résume les propositions théoriques). La réponse à la question sur le caractère "intuitif" de la théorie est donc positive, comme pour les deux autres: nous y reviendrons.

Ces questions appartiennent au "débat quantique" bien connu (du moins, dont tout le monde a entendu parler, mais souvent sans en avoir une idée très précise et claire). Mais les réponses positives que j'ai mentionnées ne préjugent pas, pour l'instant, de la réponse à la question sur la "réalité physique objective" qui correspondrait aux concepts: on s'accordera sur l'"objectivité", et l'on discutera encore éventuellement sur la "réalité".

Dans leur pratique comme dans leurs convictions épistémologiques sur la physique, les physiciens du domaine quantique n'ont aucun doute sur l'objectivité de la connaissance qu'ils s'en donnent, ne serait-ce que par la reproductibilité des expériences, par les contrôles multipliés des résultats, par l'amplification des effets (par exemple: une fois découvertes, des "particules quantiques", d'abord rares, sont ensuite produites en faisceaux de haute intensité - des millions, voire des milliards d'individus - dont on contrôle à volonté les paramètres: faisceaux de neutrinos, "usines" à bosons intermédiaires ...)

La pratique des physiciens admet donc une objectivité sans que celle-ci soit, pour l'instant, nécessairement associée à un objet au sens strict. Mais qu'est-ce à dire? C'est une objectivité sans objet au sens habituel de la notion d'objet, c'est-à-dire d'une entité possédant des propriétés; ou encore, plus précisément, puisqu'il est question de physique, une objectivité sans objets physiques tels que les décrivent et les conçoivent les théories plus classiques ... On pourra alors, soit conclure qu'il n'y a plus d'objets, mais qu'il reste l'objectivité (mais on se demandera alors à quoi rapporter cette objectivité: aux procédures d'observation, par exemple, ou de production de phénomènes, sera-t-il

généralement répondu); soit déclarer que cette objectivité correspond encore à des "objets", mais selon une autre caractérisation théorique des objets, qui échapperait à la mécanique quantique, et qui nécessiterait de la réformer ou de la compléter. Ces deux réponses transcrivent celles des deux positions antagoniques principales du débat sur l'interprétation de la physique quantique tel qu'il était traditionnellement présenté jusque voici deux ou trois décennies.

L'enjeu philosophique fondamental de ce débat, axé autour des positions respectives de **Niels Bohr** et d'**Albert Einstein**, était celui du statut de la réalité physique, c'est-à-dire de la pertinence ou non, pour la nouvelle science qu'était la physique quantique, de la catégorie de pensée "réalité physique", généralement considérée comme relevant de l'"ontologie" (et rejetée avec la "métaphysique"). (Cette situation de fait a pu être parfois masquée sous les considérations relatives à la causalité et au déterminisme mises préférentiellement en avant par d'autres protagonistes. **Wolfgang Pauli** a été l'un des premiers commentateurs à souligner avec force que l'enjeu véritable du débat entre **Einstein** et **Bohr** était bien le réalisme).<sup>5</sup>

La première réponse, en termes de procédures d'observation, sous lesquelles s'évanouirait la notion de réalité physique, c'est-à-dire celle de système physique réel existant indépendamment de ses conditions d'observation (et même, concevable indépendamment de ces conditions<sup>6</sup>), correspond à la position connue comme étant celle de l'École de Copenhague (qui comporte en fait une certaine diversité de positions), et dont une forme atténuée récente est l'"anti-réalisme".<sup>7</sup> La seconde, qui maintient la définition habituelle d'objet physique réel, estime que la mécanique quantique est une théorie incomplète, et elle comprend diverses directions pour concevoir une théorie complète: l'une, en termes de restauration du déterminisme par l'adjonction de variables cachées supplémentaires de type classique, avec **Louis de Broglie**, le "premier" **David Bohm**, **Jean-Pierre Vigié**, **Franco Selleri** ...<sup>8</sup>; une autre, en termes de maintien de la notion d'état physique réel pour des objets physiques individuels, localisés, et

<sup>5</sup>Voir son intervention dans la discussion entre **Einstein** et Max Born, publiée avec la correspondance entre ces derniers (**Einstein & Born** [1969]; voir **Paty** [à paraître, a]).

<sup>6</sup>Le choix de ces termes correspond à la formulation par **Einstein** de son exigence réaliste: toute la nuance (rarement aperçue) du réalisme critique se tient dans la distinction entre exister et concevoir (légitimement) l'existence: ce que nous pouvons dire n'échappe pas à l'espace de la pensée, mais se rapporte cependant à quelque chose qui est extérieur à celui-ci, le monde physique, la matière, en le caractérisant d'une manière précise, conceptuelle (cf. **Paty** [1988]).

<sup>7</sup>**Bohr** [1958], **Rosenfeld** [1979]. Sur l'anti-réalisme, voir **Fine** [1986], **van Frassen** [1991].

<sup>8</sup>**Bohm** [1952, 1980], **de Broglie** [1953], **Vigié** [1983], **Selleri** [2004].

de refondation théorique sur des concepts autres que les concepts "mécanico-quantiques", qui pourraient être obtenus par une voie indirecte, la mécanique quantique étant retrouvée à la limite classique: telle était la perspective revendiquée par **Einstein**.<sup>9</sup>

Bien que les positions en présence dans le débat sur l'interprétation de la physique quantique aient souvent été réduites aux deux directions indiquées, il est possible de concevoir une troisième éventualité, qui d'ailleurs s'avère exister de fait, comme nous le verrons: celle d'admettre sans restriction la théorie quantique en tant que théorie physique du domaine considéré, tout en approfondissant méta-théoriquement (en fait, épistémologiquement) les catégories de pensée qui la sous-tendent, notamment les notions mêmes d'objet physique et de propriété physique, en admettant qu'elles continuent d'avoir un sens - et même qu'elles sont nécessaires pour penser physiquement -, mais à la condition de se donner une nouvelle définition, élargie, de ces notions générales en tirant les leçons de la nouveauté des concepts et de la théorie quantique à cet égard.

Cette troisième position (ou plutôt, ce troisième groupe de positions), ne correspond pas toujours à une troisième réponse, qui serait unique, à la question sur l'objet et ses propriétés, car elle comprend dans ses variantes, aussi bien une direction philosophiquement sceptique ou indécise qu'une direction franchement réaliste (réaliste critique). Elle a moins fait parler d'elle parce qu'elle est plus récente (encore que des éléments en aient été suggérés antérieurement<sup>10</sup>), et parce qu'elle accepte la mécanique quantique comme théorie complète, tout en critiquant ou en rejetant ses interprétations philosophiques dominantes, observationalistes et non-réalistes; et encore, peut-être, parce qu'elle est soupçonnée (du moins pour ce qui est de la direction réaliste), de naïveté, en prenant pour argent comptant, c'est-à-dire pour physiques, des entités qui n'étaient jusqu'alors conçues que comme mathématiques, laissant dans l'ombre ce qui fait la différence entre une grandeur physique et une grandeur mathématique, ou s'abstenant de justifier ce qui pourrait les identifier, si c'est cela que ses partisans prétendent<sup>11</sup>.

Arrêtons-nous un instant, avant de reprendre certaines des questions épistémologiques que nous avons rencontrées, notamment la dernière (sur le rapport des entités d'expression mathématique avec les phénomènes physiques), car elle me semble correspondre au problème épistémologique fondamental. Et reprenons vue, pendant cette pause, sur le problème posé en commençant: objectivité ou constructivisme?

Un résultat, du moins, est déjà clairement acquis, concernant le premier terme: quelle que soit la direction de leur propre interprétation épistémologique, les physiciens affirment (et réalisent) l'objectivité dans la connaissance de leur domaine. C'est un résultat que l'on peut, d'ailleurs, généraliser: il n'y a pas, aux yeux des physiciens, de physique sans objectivité, et satisfaire à l'objectivité est précisément le but de tout leur travail. La difficulté et les divergences de vue portent sur la possibilité de qualifier cette objectivité en termes d'objets (caractérisés par des propriétés).

Reste à voir le second terme: sinon le constructivisme, du moins la construction . . .

### 3. Quel rapport y a-t-il entre le débat sur l'interprétation de la physique quantique et la dispute objectivité-constructivisme?

S'il y a un rapport entre le débat épistémologique sur la mécanique et la physique quantiques et la controverse diagnostiquée de nos jours, dans les débats sur la connaissance scientifique, surtout ceux suscités par les études sur la "construction sociale" des sciences<sup>12</sup>, le moins qu'on puisse dire est que ce rapport n'est pas du tout évident et qu'il n'est pas nécessairement pertinent. Il semble même que les deux types de débats soient assez étrangers l'un à l'autre. Ce qui n'interdit pas (pensée dominante et se voulant hégémonique oblige) de forcer cette mise en rapport, aujourd'hui, en voyant dans le second la forme "post-moderne"<sup>13</sup> du premier. Mais ceci n'irait pas sans déformation d'arguments et distorsions de raisonnements. Nous tenons déjà, en tout cas, un premier élément qui interdit l'identification entre les deux formes de débat: dans le débat quantique, et dans la pratique des physiciens, le constat d'objectivité est unanime.

<sup>9</sup>**Einstein** [1948, 1949]. Voir **Paty** [1993, 1995, 2001].

<sup>10</sup>Par exemple : **Dirac** [1926 a et b], **Langevin** [1934].

<sup>11</sup>Je rangerais dans cette catégorie, malgré des nuances parfois assez considérables, des conceptions qui vont d'un réalisme voilé "pour une objectivité faible" (**d'Espagnat**) à un réalisme de principe demandant une réinterprétation mais sans solution évidente en vue (**Bell**), et à un réalisme quantique " (les autres, avec encore des variantes) : **Bell** [1981], **Bunge** [1973], **d'Espagnat** [1994], **Lévy-Leblond** [1977], **Cini & Lévy-Leblond** [1990], **Omnès** [1994], **Paty** [1988, 1999, 200d, 2003k].

<sup>12</sup>Voir **Hacking** [1999].

<sup>13</sup>Pour autant que cette expression à la mode ait un sens . . .

D'un autre côté, la plupart des physiciens eux-mêmes ne s'effarouchent aucunement de qualifier des élaborations conceptuelles et théoriques comme celles de la physique quantique de constructions, mais c'est dans le sens de constructions intellectuelles. Cela est même, à leurs yeux, une nécessité de principe: il faut construire des représentations abstraites de ce domaine de la nature qui échappe à la prise des sens, quitte à les rendre ensuite concrètes en faisant en sorte qu'elles correspondent étroitement aux caractères des phénomènes physiques (tel fut d'ailleurs, déjà aux tout débuts, le sens des premières approches du domaine quantique à l'aide des probabilités conçues comme un outil mathématique)<sup>14</sup>.

Si l'on considère les réalisations, acquises ou entreprises, ce caractère de construction est tout à fait évident avec les théories des groupes de symétries telles qu'elles sont actuellement utilisées en physique fondamentale (par exemple, les symétries unitaires des particules élémentaires, ou les champs quantiques d'interactions de jauge unifiés ou en voie d'unification), mais le constat serait analogue si l'on remontait aux débuts de l'élaboration de la mécanique quantique elle-même (par exemple, la construction d'opérateurs pour exprimer les variables dynamiques, impulsion, énergie, moment angulaire, etc., à partir de générateurs infinitésimaux, de type classique). On dira, certes, que ce sont des constructions mathématiques, et non pas physiques, et on l'a dit, justement, atténuant par là-même la portée de la dimension constructive de ce travail de la pensée. Ce qui nous ramène à l'évocation des conceptions de l'École de Copenhague à ce sujet, pour laquelle ces constructions mathématiques sont purement instrumentales et auxiliaires pour la physique qui, elle, serait donnée dans l'expérience. Et pensée dans et par l'expérience aussi bien, d'ailleurs (et non pas seulement pensée en relation à l'expérience).

L'«École de Copenhague», représentant l'interprétation dominante (du moins à la belle époque de l'apparition de la mécanique quantique et de ses premières consolidations), laissait aux mathématiques les grandeurs mathématiques, abstraites et «formelles» comme les vecteurs ou fonctions d'état définis sur des espaces de Hilbert et leur principe de superposition, et les variables dynamiques exprimées par des opérateurs non-commutatifs agissant sur ces fonctions (et dénommés, pour les besoins de la cause, «observables»). A la physique revenait ce qui concerne l'observation, c'est-à-dire ce qui ressortait de la mesure, laquelle s'effectuait

nécessairement à l'aide d'appareillages dont les résultats étaient en fin de compte lus (parvenant aux sens) par l'intermédiaire de processus de la physique classique. Cette école ne concevait comme grandeurs physiques que celles qui pouvaient être mises en correspondance directe avec des résultats de mesure, autant dire, des grandeurs de type classique (les appareils de mesure étant de type classique, par définition). Il était donc sous-entendu que les grandeurs devaient être exprimées, dans cette perspective, comme des fonctions à valeurs numériques. La spécificité des phénomènes quantiques obligeait donc, selon cette vue, tout en gardant la référence à des grandeurs classiques (les seules dont on puisse parler, pour **Niels Bohr**), à ôter à celles-ci leur signification physique directe pour la description des phénomènes ou des «systèmes» quantiques. On ne pouvait pas atteindre ou décrire des «objets quantiques», mais seulement des effets de mesure sur de tels systèmes, rendus par des grandeurs classiques, qui seules accèdent aux données de la perception. Mais, peut-on se demander, n'est-ce pas là un effet d'illusion? Les grandeurs classiques elles-mêmes ne correspondaient pas, lorsqu'elles furent formulées dans l'élaboration de la physique classique, à une évidence des données des sens, et elles ont résulté de constructions intellectuelles qui étaient loin de paraître évidentes ou directement accordées aux expériences des sens.

Dans la conception de l'École de Copenhague, les grandeurs «mathématiques» du formalisme théorique ne pouvaient donc pas être conçues comme «directement» physiques: elles n'étaient rapportées aux phénomènes et aux grandeurs physiques que par le moyen de règles d'interprétation (telles que l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde ou du vecteur d'état, celle des grandeurs observées comme valeurs propres des opérateurs, l'énoncé du principe de superposition, la réduction effective, dans l'opération de mesure, du vecteur d'état à l'une seulement des composantes de la superposition linéaire qu'il constitue, etc.). Parmi ces règles, certaines correspondent à des définitions de la signification physique de grandeurs par leur mise en rapport avec des contenus physiques, et sont neutres philosophiquement: elles appartiennent à la théorie quantique dans le sens strict, et sont communément acceptées avec la mécanique quantique, indépendamment de toute autre interprétation. D'autres règles, par contre, expriment une conviction philosophique sur la connaissance, comme, par exemple, l'observationnalisme ou la complémentarité selon **Bohr**, et l'affirmation corrélatrice de

<sup>14</sup>Voir **Paty** [2002f].

la nécessité de recourir toujours à des concepts classiques, y compris dans le domaine quantique, où ils sont affectés de limitations de validité compensées par la considération de concepts ou grandeurs complémentaires; ou encore, la conception du vecteur d'état comme étant le catalogue des connaissances que l'on a d'un système et non la représentation théorique de son état physique.

Cependant, cette position philosophique, associée au second genre ("philosophique") de règles, apparaît limitée par une sorte de naturalisme, qui lui fait considérer de manière privilégiée la perception comme ayant un rôle direct dans l'accès à la connaissance. Une conception de la connaissance comme élaboration intellectuelle, dans le sens explicite de construction par l'entendement, permet, au contraire, de concevoir une approche plus abstraite et faite de manière indirecte dans le moment de la construction (ces deux adjectifs, abstraite et indirecte, ont cependant un sens relatif, comme nous l'avons vu), mais qui réussisse à intégrer dans un schème théorico-conceptuel de connaissance les éléments d'origine empirique donnés dans la perception. Des éléments d'origine empirique sont, certes, indispensables à toute connaissance physique, mais ils sont toujours repris dans la connaissance selon l'entendement, qui est celle de la compréhension, pour être transformés en concepts et grandeurs susceptibles d'être mis en relation à d'autres et d'être intelligibles.<sup>15</sup> Nulle limitation dans leur forme n'est imposée a priori dans une telle conception, sinon d'être relationnelles, comme le sont de manière privilégiée les grandeurs mathématiques.

Paradoxalement, alors que la connaissance des phénomènes atomiques et infra-atomiques était apparue de prime abord nécessiter des démarches constructives éloignée des données empiriques immédiates (puisque le monde des atomes et des radiations, des quanta, échappe à la prise des sens), une sorte de prudence, d'inspiration empiriste, aura accompagné et marqué l'accumulation de ses succès sur le plan théorique. Comme si l'exigence d'objectivité et de rationalité pour la connaissance du domaine quantique avait eu comme contrepartie la méfiance (pour ne pas dire le rejet) à l'égard des constructions intellectuelles abstraites, effectuées selon les formes mathématiques. Celles-ci étaient, en l'occurrence, retenues au titre d'un "formalisme", certes puissant, mais en fin de compte auxiliaire.

Au lieu qu'une théorie physique, telle qu'on l'avait généralement conçue jusqu'alors, de la physique classique à la relativité générale, constituait l'instance même de l'intelligibilité du domaine phénoménal considéré. Cette idée n'aurait-elle vraiment plus aucune pertinence pour le domaine quantique? C'est ce que nous nous proposons de discuter maintenant, en nous interrogeant sur le genre de construction qu'est la théorie quantique.

#### 4. En quel sens peut-on parler de construction?

Les concepts et les théories sont donc des constructions intellectuelles sur le mode de la pensée symbolique, caractéristique de la présence et de la place de l'homme dans la nature, moyen de sa compréhension de la nature et de la communication avec ses semblables. Il est donc à première vue raisonnable de considérer que ces constructions ne sont pas seulement celles de pensées individuelles, mais qu'elles ont une dimension sociale.

Depuis quelque temps l'idée de "construction sociale" des sciences est devenu l'un des chevaux de bataille d'une nouvelle socio-anthropologie des sciences préoccupée du comportement social des scientifiques en groupe, de leurs réseaux, de leurs stratégies de pouvoir, apparents notamment dans les modes de fonctionnement de la "big-science". Mais cet intérêt exclusif, qui prétend s'étendre à l'ensemble de l'histoire des sciences, se développe malheureusement au prix du délaissement et de l'effacement des aspects proprement intellectuels du mouvement de la connaissance. On nous parle, par exemple, de la "construction sociale des quarks"<sup>16</sup> (ces particules quantiques fondamentales des théories dynamiques actuelles de la matière, en théorie quantique des champs), voire de "construction sociale" de la rationalité ou de la vérité elles-mêmes.<sup>17</sup>

Ces nouvelles doctrines s'intéressent assez peu au travail rationnel effectif des physiciens et à la perspective d'objectivité qui les guident, et qu'ils revendiquent. Pour le constructivisme social radical, les concepts et les théories des physiciens sont des artefacts construits socialement, qui ne doivent leur acceptation qu'au consensus des acteurs et des manipulateurs des réseaux, occupés à des jeux de pouvoir bien plutôt qu'à la préoccupation de savoir comment le monde est fait, but illusoire, et halo idéologique sécrété par leur milieu socio-culturel, pour justifier leur activité à leurs propres yeux et à ceux du reste de la société; et les chercheurs qui s'imaginent

<sup>15</sup>Un exemple parlant de cette connaissance à deux niveaux, l'un perceptif, l'autre intellectuel, est la différence entre l'espace représentatif et l'espace géométrique, décrite par **Poincaré** (**Poincaré** [1902], chap. 4).

<sup>16</sup>**Pickering** [1984].

<sup>17</sup>**Shapin** [1994].

travailler dans (et pour) l'objectivité, ne sont, en fait, que des agents à produire des constructions sociales donnant l'illusion de l'objectivité<sup>18</sup>... Le but et les mobiles qu'ils invoquent de préférence, à savoir la solution de problèmes pour la description ou la représentation, ou pis encore, l'explication, du monde phénoménal ou du monde réel, recouvriraient des activités de nature moins noble et beaucoup plus prosaïque.

D'autres perspectives plus équilibrées et respectueuses de la dimension intellectuelle de la pensée humaine sont heureusement possibles. Considérer la production des sciences du point de vue de la construction sociale présente assurément un intérêt, quand aux conditions effectives de la production des connaissances dans les sociétés, et à leur rapport aux autres activités humaines, comme elles inscrites dans l'histoire. Mais cela n'interdit pas de prêter aussi attention aux leçons de l'épistémologie, qui est le point de vue qui s'intéresse aux contenus de connaissance, et qui seul permet d'entrer dans l'intelligibilité de ces contenus. Tenir les deux ensemble, parce que la réalité effective de la production des connaissances dans la société et dans l'histoire l'exige, est précisément la position du grand (et regretté) sociologue **Pierre Bourdieu**, qui décrit, quant à lui, la tâche de la sociologie des sciences comme étant celle d'élucider les "conditions sociales ou socio-épistémiques de possibilité des connaissances scientifiques". Elle ne se substitue aucunement à la perspective de l'épistémologie, et les deux s'éclairent en fait mutuellement pour comprendre la connaissance comme le résultat d'une activité de l'homme, être éminemment social. Du point de vue de l'épistémologie de la construction rationnelle objective, les concepts scientifiques doivent leur légitimité à un processus de caractérisation rationnelle qu'il est possible de retracer ou de retrouver par l'analyse, tant des contextes socio-historiques et culturels, que des éléments cognitifs rapportés à leur intelligibilité, tels que les représentations conceptuelles et théoriques de tels phénomènes ou entités physiques, la signification des expériences en relation à ces schèmes théoriques, et la possibilité de les penser et de les réaliser techniquement. De très nombreux exemples, pris dans

l'histoire, ou aussi bien contemporains, pourraient être examinés dans cette perspective, de l'élaboration de la mécanique quantique à la découverte des courants neutres, ou à la mise en évidence des quarks ou des bosons intermédiaires (bientôt peut-être des bosons de **Brout, Englert et Higgs**)<sup>19</sup>.

**Andrew Pickering** a cru décrypter (dans son ouvrage mentionné) la "construction sociale des quarks", et réduire ainsi la fabrique des quarks à celle d'un "consensus" au bout de "négociations"<sup>20</sup>. A tout prendre, il pourrait en dire autant à cette aune de la construction des quanta, le "confinement" et les derniers aspects de la "big science" en moins.

Les quanta et leurs "particules" (quantiques) identiques indiscernables (si peu familiers, si peu pensables initialement) ne sont pas moins construits que les quarks. Prenons donc un instant les quarks. Suivons les élaborations rationnelles qui les ont constitués en relation aux données empiriques sur les propriétés des particules élémentaires (hadroniques).

On distingue, en particulier, dans ces élaborations, telles qu'on peut les suivre dans leur déroulement<sup>21</sup>, deux temps, ou deux faces de leur mise au jour (ou de leur production conceptuelle). C'est d'abord une élaboration mathématique, qui implique la théorie des groupes de symétrie pour les grandeurs quantiques qui représentent les "propriétés" des particules (opérateurs des diverses "saveurs", isospin, étrangeté, etc.): de ce point de vue, les particules, ramenées à leurs nombres quantiques, sont constituées de quarks "mathématiques". Ce sont, ensuite, les résultats des expériences de diffusion pénétrante de particules (leptons, photons) sur d'autres (nucléons) qui mettent en évidence des centres durs de diffusion dans ces derniers, dont les propriétés en termes quantiques s'avèrent être celles des quarks précédents ("mathématiques"). D'où l'identification des deux, les quarks "mathématiques" (d'abord purement formels) et les quarks "physiques", d'abord seulement empiriques. On doit aussi faire état d'un troisième pas de la construction, où interviennent les théories de symétrie de jauge des champs d'interaction, qui incorporent les

<sup>18</sup>Cf., p. ex., **Latour** [1989]. Voir, pour des critiques de ces vues : **Gingras** [1995], **Shinn** [2000], **Bourdieu** [2001], **Paty** [2001b].

<sup>19</sup>**Paty** [2003], chap. 7, p. 116, 218.

<sup>20</sup>**Pickering** [1984].

<sup>21</sup>**Paty** [1988], chapitre 9 ; **Paty** [2003], chapitre 7.

<sup>22</sup>Notamment leur "liberté asymptotique" aux très petites distances, qui rend possible l'approche en terme de champs quantifiés même pour l'interaction forte, car elle peut dès lors être traitée en série de perturbation de la constante de couplage (celle-ci, étant petite aux très petites distances, peut être associée à une série convergente).

<sup>23</sup>Théorie dynamique du champ quantique de la "couleur" (la "couleur" est un nombre quantique caractérisant les quarks), considéré comme le champ fondamental des interactions nucléaires fortes. La terminologie, fantaisiste et parfois gratuite, joue peut-être, prise

quarks, en raison de leurs propriétés<sup>22</sup>, à titre d'“objets-sources” des champs (quantiques) d'interaction: c'est la construction de la “chromodynamique quantique”<sup>23</sup>.

Suivre à la trace les processus de ces élaborations, de ces constructions théoriques, telles qu'elles ont été proposées, mûries et testées, interdit de les réduire à de pures pratiques sociales, instrumentales, décisionnelles.

Ces pratiques, certes, se laissent constater, qui sont la marque de la dimension sociale de ces processus d'élaboration ou de construction, c'est-à-dire du contexte social dans lequel elles ont été produites, du milieu où s'est alimenté socialement et culturellement l'activité des chercheurs scientifiques, qui les ont formulées dans leur pensée (dans l'activité de leur pensée). De toute évidence, les idées ne naissent pas directement d'un “milieu social”, mais d'individus et de pensées singulières vivant dans ce milieu. Les “négociations” et persuasions qui font accepter plus ou moins vite tel énoncé de connaissance, loin d'abolir l'exigence d'intelligibilité selon la rationalité, qui est celle des pensées singulières, doivent en tenir compte au contraire en en faisant leur règle: elle y tient le rôle d'une condition de crédibilité, à laquelle les malfaçons ne résisteront pas longtemps. **Bourdieu** parle fort justement à ce propos de “condition socio-transcendantale”<sup>24</sup>.

Ces idées ont été constituées intellectuellement en vue d'un sens, et ce qui leur donne ce sens, et qui guide la pensée de leurs inventeurs, c'est une chaîne de considérations rationnelles, ordonnées à la pensée rationnelle, selon les modalités de celle-ci (c'est-à-dire conceptuelles, théoriques, et liées à des données d'expérience), qui appartiennent à un champ disciplinaire donné, et qui constituent intellectuellement ce champ. De telles élaborations sont formées par des processus de pensée qui portent sur de la pensée symbolique et en même temps sur du concret de pensée, cette dernière expression désignant des contenus physiques, se rapportant à des objets ou des phénomènes effectivement attestés (et par cela même contrôlables) qui ne suivent pas les grés de la mode, ou des circonstances budgétaires, et ne dépendent pas du relâchement et des reconfigurations des “réseaux”. Les “objets de pensée” ainsi constitués sont

stables à travers les transformations sociales, comme à travers les discours rhétoriques ou autres prononcés sur eux.

Le champ disciplinaire conçu aussi comme champ social, en toute légitimité, comme le “champ scientifique” de **Pierre Bourdieu**<sup>25</sup>, ne peut effacer ou nier l'aséité de ce “concret-de-pensée”: d'ailleurs, dans ce dernier cas, comme on vient de le dire, loin de le nier ou de l'ignorer, il le prend en compte dans l'étude des modalités de son inscription sociale, contribuant ainsi à éclairer les circonstances de sa formation ou de son fonctionnement. L'étude des comportements sociaux, conçue de cette manière (elle aussi rationnelle et scientifique), ne se propose pas de réduire à ces derniers la rationalité spécifique qui se donne cours dans la construction intellectuelle étudiée; au contraire, elle en prend acte tout en la résultant dans les conditions concrètes, historiques et sociales, de son élaboration ou de sa mise en oeuvre et en caractérisant les lignes de force qui l'accompagnent dans cet ordre. L'approche sociologique de l'activité scientifique peut alors à bon droit se présenter comme l'étude des “conditions sociales de possibilité” de telle connaissance scientifique<sup>26</sup>, ou de tel type de rationalité, et loin de concurrencer ou de rejeter l'approche philosophique et épistémologique des objets intellectuels du champ, elle la complète en apportant cette dimension, éclairante à son niveau.

Cependant il est probable que des aspects contingents, liés à une culture particulière du groupe des spécialistes du domaine, ont joué un rôle non neutre dans cette élaboration, aussi bien pour la physique quantique que pour les quarks, ou les neutrinos, ou les courants neutres, etc., aboutissant à ce qu'une interprétation (ou une voie de recherche), plutôt qu'une autre, soit prédominante durant un certain temps. Il serait, assurément, intéressant d'étudier de tels effets, combinant ici l'analyse épistémologique et l'enquête sociologique.<sup>27</sup>

### 5. Pratique de la pensée des concepts et intelligibilité (un aspect “socio-cognitif” de l'interprétation de la mécanique quantique)

Par exemple, la longue domination de l'interprétation observationnaliste de la mécanique quantique est

superficiellement, contre la considération du caractère objectif et “réel” de ces entités; d'un autre côté, elle rend directement manifeste qu'il s'agit de constructions.

<sup>24</sup>**Bourdieu** [2001].

<sup>25</sup>**Bourdieu** [1976, 2001].

<sup>26</sup>Cette expression de **Bourdieu**, déjà évoquée plus haut, fait assez voir, par sa référence implicite à **Kant**, qu'elle ne nie pas la préoccupation pour le rationnel, mais la complète par la mise en contexte.

<sup>27</sup>Ce serait un genre d'enquête dans la direction des études de **Peter Galison** (**Galison** [1987, 1997] ; voir l'analyse qui en est proposée dans **Darrigol** [1998]), et de celles de **Terry Shinn** sur la recherche-technologie” (**Shinn** [1993, 1999, 2000], **Joerges & Shinn** [2001]).

indéniablement liée à la pression d'une "école" (celle de **Bohr**, l'École dite "de Copenhague"), stratégiquement influente pour des raisons que l'on peut décrire.

Elle obtint le ralliement presque général de la "communauté" des physiciens quantiques, à quelques "dissidents" près, le plus irréductible d'entre eux étant **Einstein**, qui refusait de transiger sur la question de la réalité physique comme étant à ses yeux l'objet même de la théorie physique. (**Einstein** invoquait l'idée d'une "réalité physique" d'une manière qui dépassait le simple positionnement "métaphysique" ou "ontologique", en la rapportant à des critères cognitifs propres aux déterminations de la physique: selon lui, la physique décrit des "éléments de réalité physique" individuels existant indépendamment de leur observation<sup>28</sup>).

Les physiciens quantiques ont ainsi développé, autour de **Niels Bohr**, une "orthodoxie" qui a eu, d'ailleurs, des avantages: elle leur a permis de ne pas se laisser distraire par des insatisfactions quant aux fondements, et à continuer d'aller de l'avant dans les constructions de la physique atomique et subatomique (nucléaire et subnucléaire). Mais cette orthodoxie n'a finalement pas été maintenue envers et contre tout, et les idées se sont décantées avec le temps et l'expérience acquise, dissociant, en particulier, les considérations liées à l'interprétation philosophique et les énoncés purement physiques. Ces derniers continuent, en dehors de toute obédience "orthodoxe", à participer du bagage de tout physicien quantique et constituent des "invariants", alors que les positions générales comme l'observationnalisme et la complémentarité dans le sens philosophique (bohrien) se sont plutôt effilochées au fil des décennies: il en subsiste aujourd'hui surtout des résidus fossilisés dans le vocabulaire ("incertitude", "indétermination", "observables" ...), qui ne sont plus désormais que les vestiges témoins des circonstances contingentes (de nature socio-culturelle) des élaborations initiales.

Mais ici, un effet intéressant s'est produit, qui nous permet d'estimer que, malgré les distorsions indiquées, d'origine sociale et culturelle, malgré les effets de "construction sociale", la pensée scientifique est mue par un entraînement bien plus déterminant qui permet de les dépasser, et dont la force tient au jeu de l'activité rationnelle et de la nature (entendue comme la physis, le monde extérieur à la pensée et à la société), avec entre

les deux l'exercice d'une pratique de la pensée physique, théorique et expérimentale, par les physiciens des laboratoires de recherche. C'est que, au bout du compte, en étant "allés de l'avant", ces physiciens en sont venus, pour ainsi dire naturellement, à penser les systèmes physiques dont ils traitent comme des "objets" (c'est-à-dire des entités physiques ayant des propriétés), alors qu'une telle "simplification" leur avait été initialement interdite.

S'ils le peuvent désormais, ce n'est pas en ayant transgressé l'interdit dans les bonnes raisons qu'il avait (ne pas réduire le quantique au classique), mais en l'ayant contourné: ils ont maintenu l'exigence de penser les systèmes quantiques différemment des objets classiques antérieurs, puisqu'ils n'ont pas cessé d'appliquer le mode d'approche théorique-quantique, qui n'est autre que celui de la théorie quantique, avec ses grandeurs (dites) mathématiques (vecteurs d'état, opérateurs, ...) portées de fait (sans que cela soit dit tout haut) au rang de concepts physique, et son "formalisme" propres. Et ce dernier apparaît n'être autre, en fin de compte, dans leur pensée effective, que la forme même de la théorie (dans le sens de théorie physique pour un champ de phénomènes). Ils ont intégré ce mode d'approche (théorique-quantique) à ce qu'ils conçoivent de fait, dans la pratique de leur travail, comme étant des "objets physiques" et des "propriétés" de tels objets, ces derniers prenant leur sens de la théorie elle-même<sup>29</sup>. Il l'ont d'autant mieux intégré qu'ils ont conçu et réalisé leurs expériences en fonction de lui. Ils ont, pour ainsi dire, matérialisé (ou concrétisé), dans les dispositifs expérimentaux mêmes, les concepts et la théorie quantique, leur faisant prendre corps en réalisant ce que **Bachelard** appelait une "phénoménotéchnique"<sup>30</sup>.

Faisons à cet égard deux remarques. La première, que l'intégration dont il est question s'est faite par assimilation et intériorisation. La seconde, qu'il est possible, ce faisant, d'affiner notre conception d'"objets" et de "propriétés" (par extension de sens, de type catégoriel). De fait, l'idée d'assimiler entretient un lien avec l'idée de remodeler des catégories (comme celles de grandeur physique, d'objet et de propriété physique)<sup>31</sup>.

Remarquons en outre, incidemment, que l'on pourrait étudier sous cet angle, dans une enquête en même

<sup>28</sup> **Paty** [à paraître, a].

<sup>29</sup> **Paty** [1999].

<sup>30</sup> **Bachelard** parlait de la "réalisation du rationnel dans l'expérience physique" (**Bachelard** [1934], p. 5, 13). Voir aussi **Bachelard** [1949].

<sup>31</sup> Voir, à propos des "grandeurs physiques" en général, **Paty** [2001a]; et sur l'assimilation dans le sens indiqué: **Paty** [2005o].

temps épistémologique et sociologique, l'activité effective des chercheurs en physique atomique, nucléaire, ou des particules élémentaires, aussi bien des théoriciens "phénoménologiques" (proches de l'expérience) que des expérimentateurs travaillant sur l'analyse des données, ou concevant et réalisant les appareillages, les accélérateurs, les faisceaux de particules quantiques et les détecteurs. Et parmi ces physiciens, en particulier, ceux (physiciens atomistes et opticiens quantiques) qui s'attachent à "fabriquer" et à étudier physiquement les phénomènes les plus simples et les plus "fondamentaux" du point de vue des bases conceptuelles et théoriques de la physique quantique, c'est-à-dire ces phénomènes "non classiques" que sont l'interférence d'une particule quantique avec elle-même, la condensation de Bose-Einstein, la décohérence, etc., dont nous reparlerons un peu plus loin.

Cependant, les recherches existantes d'histoire sociale des sciences ou de socio-épistémologie sur des domaines liés à la physique quantique n'ont pas envisagé, à ma connaissance, cette perspective, et leurs auteurs ne se sont pas intéressés jusqu'ici à ce problème précis, que nous pouvons désigner comme: les implications épistémologiques de la pratique scientifique et sociale de la physique quantique. Ce serait là, pourtant, un lieu très original de rencontre et de confrontation entre les questions fondamentales de l'épistémologie (ici, l'épistémologie de la mécanique quantique) et l'étude socio-historique du travail des physiciens qui oeuvrent dans ces domaines. C'est un fait que cette rencontre de terrain n'a pas encore eu lieu, car les épistémologues du débat quantique restent cantonnés aux approches purement philosophiques, ou prétendues telles, tandis que les sociologues et socio-épistémologues s'intéressent à d'autres problèmes de "construction" de la physique contemporaine qu'à ceux relatifs à la mécanique quantique elle-même. Je voudrais signaler, toutefois, les récentes études originales d'**Olival Freire** et de ses élèves sur l'institutionnalisation de la dimension épistémologique de la physique dans le champ disciplinaire de la physique quantique, qui a entériné la légitimité du débat sur les fondements et l'interprétation<sup>32</sup>.

Ce qui, du moins, a eu lieu, c'est l'expérience, faite régulièrement par les physiciens dans leur travail de recherche, de ce que les concepts théoriques de la mécanique quantique constituent de fait le cadre de

pensée par lequel ils accèdent aux systèmes et aux phénomènes physiques (quantiques) qu'ils étudient. En pratiquant l'exercice de la pensée physique dans ce cadre, celui-ci leur est devenu comme une seconde nature, ou encore, ce cadre de pensée leur est devenu proprement "intuitif"; et il perdait, par là-même, toute nécessité d'être interprété à l'ancienne manière ("orthodoxe"), qui rapportait le quantique au classique, certes sans le réduire, mais en prenant le mode classique de penser et d'observer pour référence indépassable.

Autrement dit, ces physiciens ont inventé, ou codifié, ce faisant, une autre manière de penser ces systèmes quantiques comme objets, en les rendant concrets, directs, intuitifs, dans un sens autre que celui relatif aux objets des conceptions antérieures, ce sens ayant été insufflé dans leur pensée (rationnelle) en physique par leur pratique de la physique quantique (pratique théorique ou expérimentale, parfois les deux ensemble). Ils ont, sans le dire et l'explicitier, conçu autrement ce qu'est un objet physique, et ils le font fonctionner pratiquement, dans leur pensée, sans nécessairement en avoir une conscience explicite. Souvent, d'ailleurs, tout en contrevenant ainsi par leur "pensée pratique" aux règles de l'interprétation orthodoxe, ils en répètent certains éléments du credo. En d'autres termes, leur épistémologie exprimée n'est pas toujours conforme à la pratique de leur pensée conceptuelle et théorique du domaine quantique (et même, qu'ils me pardonnent d'oser un tel jugement, elle reste bien en-deçà).

Dans la nécessité où ils se trouvaient de formuler des objets correspondant à l'objectivité qu'ils poursuivaient, ils ont, non seulement exploré ce domaine avec fruit, révélant de nouvelles propriétés, objectives encore, de la matière physique, mais ils ont même fabriqué en laboratoire de tels objets, impensables sans la théorie quantique. Et, en particulier, les "objets" les plus simples à décrire dans le cadre de la théorie quantique, en ce qu'ils correspondent exactement aux caractéristiques dites "mathématiques" (transposées en "représentation de systèmes et de propriétés physiques") des entités théoriques de la mécanique quantique, comme le vecteur d'état pour représenter et décrire l'état physique même (cette "fonction d'onde sans onde" des débuts de la théorie) et les opérateurs non-commutatifs (matrices, différenciation, etc.) pour représenter et décrire les propriétés de tels systèmes et de leurs états.

<sup>32</sup>Freire [1999, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007]. On doit mentionner également les efforts et les réalisations concernant l'enseignement de la mécanique quantique de base, qui tiennent compte des leçons du débat sur l'interprétation : Bohm [1951]. Diu, Cohen-Tannoudji & Laloë [1973] ; Lévy-Leblond & Balibar [1984], etc.

Tels sont les systèmes quantiques individuels qui engendrent à eux seuls des phénomènes spécifiquement quantiques, naguère conçus seulement de manière statistique (diffraction et interférence avec eux-mêmes d'électrons, de photons, de neutrons, d'atomes, produits individuellement, interaction d'atomes individuels avec leur propre champ électromagnétique, etc.); ou les systèmes quantiques identiques indiscernables, symétriques ou antisymétriques par la permutation de deux d'entre eux, donnant la condensation de Bose-Einstein dans un cas, le principe d'exclusion de **Pauli** dans l'autre, avec des conséquences physiques considérables (constatées) dans les deux. Ces phénomènes, qui eussent été impensables sans la théorie quantique et ses grandeurs, nous font comme "toucher du doigt" le vecteur d'état (ou la fonction d'onde) par le système quantique "simple" correspondant, qui engendre directement ces effets.

En quelque sorte, il y a un enserrement de ce qui est physique (ces états de systèmes quantiques) par la description théorique avec ses grandeurs propres, qui sont l'expression de ses concepts. Ces concepts, intellectuellement construits, peuvent être vus, dans leur expression mathématique même, comme de nouveaux modes de description ou de qualification de la "réalité physique", en ce sens que les grandeurs qui les transcrivent fournissent, par leurs relations, la description exacte des propriétés de ces systèmes. On peut y voir une extension de sens de la notion de grandeur physique, au-delà du purement numérique et du directement mesurable, alors que la conception de **Bohr** interdisait par principe une telle vue (puisque'il n'y avait, pour lui, de concept physique que classique)<sup>33</sup>.

A supposer que tel soit effectivement le cas, ce ne serait jamais qu'une règle du jeu qui change, dira-t-on. Par quoi nous voici ramenés au "construit social" et à sa rhétorique fermée! Mais ce serait voir les choses par le petit bout de la lorgnette, et supprimer toute l'épaisseur, du point de vue cognitif, de l'activité pratique de cette pensée, qui a intériorisé le changement (avec toujours le recours à l'expérience comme pierre de touche du possible pour le réel), mais aussi qui l'a rendu concret, par la production d'effets physiques, matériels, immédiatement intelligibles. Car il semble bien nécessaire, pour identifier et recevoir de la nouveauté (dans une découverte) et pour l'assimiler, que la rationalité, à l'oeuvre dans le travail de la pensée, s'élargisse pour lui faire une place et l'inclure, pour l'intégrer, alors que cette nouveauté qui se présente ainsi était auparavant impossible

à concevoir, dans les cadres de pensée antérieurs trop étroits.

Ces élargissements de rationalité auraient sans doute été impossibles en dehors de l'existence d'une "communauté", d'un groupe social d'individus échangeant des pensées (par l'éducation, la recherche, la communication, la transmission, etc.). Mais, dans ces élargissements du rationnel (des formes de rationalité), ce qui pénètre le rationnel pour le transformer ce n'est pas du social, dans le cas considéré ici de la physique; c'est plutôt quelque chose du monde extérieur, par le biais du donné empirique qui demandait à être compris, c'est-à-dire à être intégré rationnellement. Ce qui s'est opéré ici, d'un point de vue fondamental, c'est que du rationnel s'est nourri d'empirique pour se transformer en quelque chose qui reste encore fondamentalement du rationnel, un rationnel plus large, à la manière d'un organisme qui croît et se complexifie en préservant la constitution de son milieu interne, les tendances de sa structuration propre<sup>34</sup>.

Il reste que, dans cette assimilation-transformation de quelque chose d'empiriquement donné en du rationnel directement intelligible, qui aboutit (ou devrait aboutir) à un changement de l'interprétation, correspondant à une autre pensée du contenu physique de la théorie, la pratique des physiciens, comme activité individuelle et sociale, joue assurément un rôle considérable, qu'il serait intéressant d'analyser plus avant. Mais il ne s'agit aucunement de réduction du contenu de pensée scientifique à du "construit social".

La faiblesse congénitale de l'explication des connaissances scientifiques par la "construction sociale", c'est de vouloir ignorer la spécificité du rationnel, la capacité d'auto-consistance et d'élargissement de la pensée rationnelle, la présence et la résistance du monde extérieur (le "réel", la "nature"), et l'objectivité des différents champs scientifiques. Autrement dit, le social n'est pas un dissolvant d'objectivité et de rationalité, mais le milieu ambiant au sein duquel de l'objectivité est produite par construction, à partir de l'expérience du monde, selon les modes du rationnel. Par rapport à cela, tout discours d'extériorité et de pure rhétorique est vain et ne construit, au mieux, que des sophismes.

<sup>33</sup>Paty [1999, 2000d, 2001a, 2002f, 2003k].

<sup>34</sup>Paty [2005o].

## Références Bibliographiques

- [1] **Bachelard, Gaston**. [1934]. *Le nouvel esprit scientifique*, Alcan, Paris, 1934; 9<sup>e</sup> éd., Presses Universitaires de France, Paris, 1966.
- [2] **Bachelard, Gaston**. [1938]. *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, Paris, 1938.
- [3] **Bachelard, Gaston**. [1949]. *Le rationalisme appliqué*, Presses Universitaires de France, Paris, 1949.
- [4] **Bell, John S.** [1987]. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987. 1949.
- [5] **Ben-Dov, Yoav** [1988]. *Versions de la mécanique quantique sans réduction de la fonction d'onde*, Thèse de doctorat, Université Paris-13, 1988.
- [6] **Bohm, David** [1951]. *Quantum Theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (USA), 1951.
- [7] **Bohm, David** [1952]. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden variable s", *Physical Review* **85**, 1952, 166-179, 180-193; repris dans **Bohm** [1980].
- [8] **Bohm, David** [1980]. *Wholeness and the implicate order*, Routledge and Kegan Paul, London, 1980.
- [9] **Bohr, Niels** [1958]. *Atomic physics and human knowledge*, New York, Wiley, 1958; trad. fr. par **Edmond Bauer** et **Roland Omnès**, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gauthier-Villars; nlle éd. établie par **Catherine Chevalley**, Paris, Gallimard, 1991.
- [10] **Bourdieu, Pierre** [1976]. Le champ scientifique, *Actes de la recherche en sciences sociales*, n°2/3, 1976, 88-103.
- [11] **Bourdieu, Pierre** [2001]. *Science de la science et réflexivité*, Raison d'Agir, Paris, 2001.
- [12] **Brogie, Louis de** [1953a]. *La physique quantique restera-t-elle indéterministe?*, Gauthier-Villars, Paris, 1953.
- [13] **Buchwald, Zed** (ed.) [1995]. *Scientific Practice: Theories and Stories of Doing Physics*, Chicago University Press, Chicago, 1995.
- [14] **Bunge, Mario** [1973]. *Philosophy of physics*, Reidel, 1973; tr. fr., *Philosophie de la physique*, Paris, Seuil, 1975.
- [15] **Cini, Marcello & Lévy-Leblond, Jean-Marc** (eds.) [1990]. *Quantum theory without reduction*, Adam Hilger, 1990.
- [16] **Darrigol, Olivier** [1992]. *From c-Numbers to q-Numbers. The classical Analogy in the History of Quantum Theory*, University of California Press, Berkeley, 1992.
- [17] **Darrigol, Olivier** [1998]. Toward a new topology of scientific practice, *Historical Studies in the Philosophical Sciences*, **28**, 1998 (n°2), 337-351.
- [18] **Dirac, Paul A. M.** [1926a]. Quantum mechanics and a preliminary investigation of the hydrogen atom, *Proceedings of the Royal Society of London*, **A 110**, 1926, 561-579; repr. partiel dans **Waerden** [1967], p. 417-427.
- [19] **Dirac, Paul A. M.** [1926b]. On quantum algebra, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, **23**, 1926, 412-418.
- [20] **Dirac, Paul A. M.** [1930]. *The principles of quantum mechanics*, Clarendon Press, Oxford, 1930. 4th ed., 1958. Trad. fr. par **Alexandre Proca & Jean Ullmo**, *Les principes de la mécanique quantique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1931.
- [21] **Diu, Bernard, Cohen-Tannoudji, Claude & Laloe, Franck** [1973]1997. *Mécanique quantique*, Paris, Hermann, 1973, 2 vols.
- [22] **Einstein, Albert** [1948]. Quantenmechanik und Wirklichkeit, *Dialectica* **2**, 1948, 35-39. Trad. fr., *Mécanique quantique et réalité*, in **Einstein** [1989], p. 244-249.
- [23] **Einstein, Albert** [1949]. Reply to criticism. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume, in **Schilpp** [1949], p. 663-693.
- [24] **Einstein, Albert & Max Born** [1969]. *Briefwechsel 1916-1955*, Nymphenburger Verlagshandlung GmbH, München, 1969. Trad. fr. par **Pierre Leccia**, *Correspondance 1916-1955, commentée par Max Born*, Seuil, Paris, 1972.
- [25] **Einstein, Albert** [1989-1983]. *Oeuvres choisies*, trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud et al., édition sous la dir. de **Françoise Balibar**, Seuil/éd. du CNRS, Paris, 1989-1993, 6 vols.
- [26] **D'Espagnat, Bernard** [1994]. *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*, Fayard, Paris, 1994.
- [27] **Fine, Arthur** [1986]. *The Shaky Game. Einstein Realism and the Quantum Theory*, The University of Chicago Press, Chicago, 1986.
- [28] **Frassen, Baas van** [1991]. *Quantum Mechanics, an empiricist view*, Oxford University Press, Oxford, 1991.
- [29] **Freire, Olival** [1999]. *David Bohm e a Controversia dos Quanta*, Coleção CLE, n° 27, Centro de Lógica e Epistemologia, Unicamp, Campinas (SP, Brasil), 1999.
- [30] **Freire, Olival**[2003]. A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950-1970, *Science & Education*, **12**, 2003, 573-58.
- [31] **Freire, Olival** [2004]. The Historical Roots of "Foundations of Quantum Physics" as a Field of Research (1950-1970), *Foundations of Physics*, **34**, 2004, 1741-1760.
- [32] **Freire, Olival** [2005]. Science and Exile: David Bohm, the cold war, and a new interpretation of Quantum Mechanics, *Historical Studies in the Physical Sciences*, **36**, 2005, 1-34.
- [33] **Freire, Olival** [2006]. Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965-1982), *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **37**, 2006, 577-616.
- [34] **Freire, Olival** [2007]. Orthodoxy and heterodoxy in the research on the foundation of quantum physics: E. P. Wigner's case, in **Boaventura de Souza Santos** (ed.), *Cognitive Justice in a Global World. Prudent Knowledges for a Decent Life*, LexingtonBooks, Rowman & Littlefield, Lanham, 2007, p. 203-209.
- [35] **Galison, Peter** [1987]. *How Experiment End*, Chicago University Press, Chicago, 1987.
- [36] **Galison, Peter**[1997]. *Image and Logic: a Material Culture of Microphysics*, Chicago University Press, Chicago, 1997.
- [37] **Gingras, Yves** [1993]. Constructing a Tokamak, *Social Studies of Science*, vol. **23**, n°1, 1993, pp. 5-36.
- [38] **Gingras, Yves** [1995]. Un air de radicalisme. Sur quelques tendances récentes en sociologie de la science et de la technologie, *Actes de la recherche en sciences sociales*, n°108, juin 1995, 3-17.
- [39] **Gingras, Yves** [2001]. Mathématisation et exclusion: Socio-analyse de la formation des cités savantes, in **Wunenburger, Jean-Jacques** (éd.), *Bachelard et l'épistémologie française*, coll. Débats philosophiques, PUF, Paris, 2001.

- [40] **Hacking, Ian** [1999]. *The social construction of what?*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), 1999.
- [41] **Jammer, Max** [1974]. *The philosophy of quantum mechanics. The interpretations of quantum mechanics in historical perspective*, Wiley and sons, New York, 1974.
- [42] **Joerges, Bernard & Shinn, Terry** (eds.) [2001]. *Instrumentation between science, state and industry*, Kluwer, Dordrecht, 2001.
- [43] **Langevin, Paul** [1934]. *La notion de corpuscules et d'atomes*, Hermann, Paris, 1934.
- [44] **Latour, Bruno** [1989]. *La science en action*, La Découverte, Paris, 1989.
- [45] **Leite Lopes, José & Paty, Michel** (eds.) [1977]. *Quantum Mechanics, a Half Century Later*, Reidel, Dordrecht, 1977.
- [46] **Levy-Leblond, Jean-Marc** [1977]. Towards a proper quantum theory, in **Leite Lopes & Paty** [1977], p. 172–205.
- [47] **Levy-Leblond, Jean-Marc & Balibar, Françoise** [1984]. *Quantique. Rudiments*, Ed. du CNRS-Interéditions, Paris, 1984.
- [48] **Mehra, Jagdish & Rechenberg, Helmut** [1982]. *The Historical Development of Quantum Theory*, vol. 4, Parts 1 and 2, Springer-Verlag, New-York, Berlin, 1992.
- [49] **Omnès, Roland** [1994]. *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, 1994.
- [50] **Paty, Michel** [1988]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988.
- [51] **Paty, Michel** [1993a]. *Einstein philosophe*, Presses Universitaires de France, 1993.
- [52] **Paty, Michel** [1993b]. Sur les variables cachées de la mécanique quantique: Albert Einstein, David Bohm et Louis de Broglie, *La Pensée*, n° 292, mars-avril 1993, 93–116.
- [53] **Paty, Michel** [1995]. The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics, *Foundations of Physics* **25**, 1995, n°1 (january), 183–204.
- [54] **Paty, Michel** [1999]. Are quantum systems physical objects with physical properties?, *European Journal of Physics* **20**, 1999 (november), 373–388.
- [55] **Paty, Michel** [2000b]. Interprétations et significations en physique quantique, *Revue Internationale de Philosophie*, n° 212, 2–2000, 17–60.
- [56] **Paty, Michel** [2000d]. The quantum and the classical domains as provisional parallel coexistents, *Synthese* (Kluwer, Dordrecht/Boston), **125**, n° 1–2, oct.-nov. 2000, 179–200. (In **French, Steven; Krause, Décio; Doria, Francisco** (eds.), *In honour of Newton da Costa, on the occasion of his seventieth birthday*).
- [57] **Paty, Michel** [2001a]. La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique, in **Espinoza, M.** (éd.), *Deuxième Journée de Philosophie des Sciences Jean Largeault* (Paris, mai 1999), L'Harmattan, Paris, 2001, sous presse. Engl. transl.: *The idea of quantity at the origin of the legitimacy of mathematization in physics*, in **Gould, Carol** (ed.), *Constructivism and Practice: Towards a Historical Epistemology*, Rowman & Littlefield, Lanham (Md.,USA), 2003, p. 109–135.
- [58] **Paty, Michel** [2001b]. Uma visão antropológica do conhecimento científico (resenha de "Bruno Latour, *Ciência em Ação. Como seguir cientistas e engenheiros sociedade afora*, São Paulo, Editora Unesp"), *Ciência Hoje* (São Paulo, Br), vol. **28**, n°168, janeiro-fevereiro de 2001, 68–69.
- [59] **Paty, Michel** [2001c]. Intelligibilité et historicité (Science, rationalité, histoire), in **Saldaña, Juan José** (ed.), *Science and Cultural Diversity. Filling a Gap in the History of Science*, Cuadernos de Quipu 5, México, 2001, p. 59–95.
- [60] **Paty, Michel** [2002f]. La physique quantique ou l'entraînement de la forme mathématique sur la pensée physique, in **Mataix, Carmen & Rivadulla, Andrés** (eds.), *Física cuantica y realidad. Quantum physics and reality*, Editorial Complutense, Madrid, 2002, p. 97–134.
- [61] **Paty, Michel** [2003k]. The concept of quantum state: new views on old phenomena, in **Ashtekar, Abhay; Cohen, Robert S.; Howard, Don; Renn, Jürgen; Sarkar, Sahotra & Shimony, Abner** (eds.), *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics: Festschrift in Honor of John Stachel*, Boston Studies in the Philosophy and History of Science, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003, p. 451–478.
- [62] **Paty, Michel** [2005d]. The problem of the physical interpretation of theoretical quantities and the intelligibility of the quantum world, in **Debru, Claude & Paty, Michel** (éds.), *Changes in interpretation and conceptual contents. Changements dans l'interprétation et contenus conceptuels*, in **Saldaña, Juan José** (ed.), *Science and Cultural Diversity*. Proceedings of the xxist International Congress of History of Science (Mexico, 2001), Universidad Autónoma de México & Sociedad Mexicana de Historia de la Ciencia y de la Tecnología, CD-Rom, México, 2005, vol. 37, p. 2774–2793.
- [63] **Paty, Michel** [2005o]. Des Fondements vers l'avant. Sur la rationalité des mathématiques et des sciences formalisées, *Philosophia Scientiæ* (Univ. Nancy 2/Kimé, Paris), **9** (2), 2005, 109–130.
- [64] **Paty, Michel** [à paraître, a]. Einstein, les quanta et le réel (critique et construction théorique), à paraître.
- [65] **Paty, Michel** [en préparation]. La connaissance scientifique comme pensée symbolique.
- [66] **Pickering, Andrew** [1984]. *Constructing Quarks. A Sociological History of Particle Physics*, Edinburgh University Press, Edinburgh, 1984.
- [67] **Poincaré, Henri** [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, 1902.
- [68] **Rosenfeld, Léon** [1979]. *Selected papers*, edited by **Robert S. Cohen & John Stachel**, Reidel, Dordrecht, 1979.
- [69] **Schilpp, Paul-Arthur** [1949]. *Albert Einstein: philosopher-scientist*, The Library of Living Philosophers, Open Court, Lassalle (Ill.), 1949. Ré-ed. 1970.
- [70] **Selleri, Franco** [2007]. *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [71] **Shapin, Steven** [1994]. *A Social History of Truth. Civility and Science in Seventeenth Century England*, University of Chicago Press, Chicago, 1994.
- [72] **Shinn, Terry** [1993]. The Bellevue grand électroaimant, 1900–1940. Birth of a research-technology community, *Historical Studies in the Physical Sciences*, **24** (1) 1993, 157–187.
- [73] **Shinn, Terry** [1999]. Change or mutation? Reflections on the foundations of contemporary science, *Social Science Information* **38** (n°1, March), 149–176.

- [74] **Shinn, Terry** [2000]. Formes de division du travail scientifique et convergences intellectuelles. La recherche technico-instrumentale, *Revue Française de Sociologie* **41** (3), 447–473.
- [75] **Vigier, Jean–Pierre** [1983]. Le Débat Bohr-Einstein, in **Bitsakis, Eftichios** (ed.), *The Concept of Physical Reality*, Zacharopoulos, Athens, 1983, p. 51–109.
- [76] **Waerden, B. L. van der** (ed.) [1967]. *Sources of quantum mechanics*, North Holland, Amsterdam, 1967.
- [77] **Wheeler, John A. & Zurek, Wojcieh H.** (eds.) [1983]. *Quantum theory of measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983.

Recibido: noviembre 26 de 2008

Aprobado: febrero 24 de 2009

# COMPORTAMIENTO EN EL INFINITO DE LAS SOLUCIONES DE UNA CLASE ABSTRACTA DE ECUACIONES DE EVOLUCIÓN

por

Gilberto Arenas Díaz<sup>1</sup>, Henry Lamos Díaz<sup>2</sup>  
& Elder Jesús Villamizar Roa<sup>3</sup>

## Resumen

**Arenas Díaz, G., H. Lamos Díaz & E. J. Villamizar Roa:** Comportamiento en el infinito de las soluciones de una clase abstracta de ecuaciones de evolución. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32** (122): 79-91, 2009. ISSN 0370-3908.

Basados en técnicas conocidas para el análisis de la existencia de soluciones débiles de las ecuaciones de Navier-Stokes, estudiamos varios aspectos del comportamiento en el infinito de las soluciones de una clase abstracta de ecuaciones de evolución en un espacio de Hilbert separable, la cual generaliza varios modelos de ecuaciones de la mecánica de los fluidos. En particular, se estudia la existencia y unicidad de soluciones globales, la existencia de un atractor global y la convergencia para las soluciones estacionarias asociadas.

**Palabras clave:** Atractor global, Comportamiento en el infinito de ecuaciones de evolución, condiciones de Carathéodory.

## Abstract

Using some well known techniques to analyze the existence of weak solutions for the Navier-

---

1 Universidad Industrial de Santander, Escuela de Matemáticas, Bucaramanga. Correo electrónico: garenasd@uis.edu.co

2 Universidad Industrial de Santander, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Bucaramanga. Correo electrónico: hamos@uis.edu.co

3 Universidad Industrial de Santander, Escuela de Matemáticas, Bucaramanga. Correo electrónico: ejvillami@uis.edu.co. AMS Classification 2000: Primaria: 35B40, 35B41. Secundaria: 35B60.

Stokes equations, we study several topics related with the long time behavior of solutions of an abstract class of evolutions equations in a separable Hilbert space, which generalizes several models of fluids mechanic. In particular we study the existence and uniqueness of weak solutions, as well as the existence of a global attractor and the convergence of solutions to the associated steady solutions.

**Key words:** Global attractor, Behaviour at infinity of evolution equations, Carathéodory conditions.

## 1. Problema abstracto

Estamos interesados en el estudio de soluciones de la siguiente clase abstracta de ecuaciones de evolución en un espacio de Hilbert separable  $X$ :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_t + A\mathbf{u} + B(\mathbf{u}, \mathbf{u}) + B_1\mathbf{u} + B_2\mathbf{u} = \mathbf{f}, \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \end{cases} \quad (1)$$

donde  $A$ ,  $B_1$  y  $B_2$  son operadores lineales en  $X$  y  $B$  es un operador bilineal en  $X$ . Además, estos operadores satisfacen ciertas condiciones adicionales las cuales se describen a continuación:  $A$  es un operador autoadjunto, estrictamente positivo en  $X$  con dominio  $D(A)$  e inversa compacta. Por lo tanto, existe una base ortonormal de  $X$ , denotada por  $\{\mathbf{w}_j\}_{j \in \mathbb{N}}$ , tal que  $A\mathbf{w}_j = \lambda_j\mathbf{w}_j$ ,  $j = 1, 2, \dots$   $0 < \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \rightarrow \infty$ . El producto escalar y la norma en  $X$  son denotadas por  $(\cdot, \cdot)$  y  $|\cdot|$ , respectivamente. Como  $\{\mathbf{w}_j\}_{j \in \mathbb{N}}$  es una base ortonormal en  $X$ , para todo  $\mathbf{u} \in X$  tenemos

$$\mathbf{u} = \sum_{j=1}^{\infty} c_j \mathbf{w}_j, \quad \text{donde} \quad c_j = (\mathbf{u}, \mathbf{w}_j).$$

El dominio del operador  $A$  es dado por

$$D(A) = \left\{ \mathbf{u} = \sum_{j=1}^{\infty} c_j \mathbf{w}_j : \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j^2 c_j^2 < \infty \right\}.$$

Para  $\mathbf{u} \in D(A)$  tenemos  $A\mathbf{u} = \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j c_j \mathbf{w}_j$ . Gracias a esta caracterización se definen las potencias  $A^\theta : D(A^\theta) \rightarrow X$ ,  $\theta \in \mathbb{R}$ ,  $0 \leq \theta \leq 1$ , con dominio

$$D(A^\theta) = \left\{ \mathbf{u} = \sum_{j=1}^{\infty} c_j \mathbf{w}_j : \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j^{2\theta} c_j^2 < \infty \right\},$$

por  $A^\theta \mathbf{u} = \sum_{j=1}^{\infty} \lambda_j^\theta c_j \mathbf{w}_j$  y  $c_j = (\mathbf{u}, \mathbf{w}_j)$ . Denotamos por  $X^\alpha = D(A^{\alpha/2})$ . Los espacios  $X^\alpha$  son espacios de Hilbert con el producto interno definido por

$$(\mathbf{u}, \mathbf{v})_\alpha = (A^{\alpha/2} \mathbf{u}, A^{\alpha/2} \mathbf{v}).$$

La norma asociada será denotada por  $|\cdot|_\alpha$ . También denotamos  $((\mathbf{u}, \mathbf{v})) = (\mathbf{u}, \mathbf{v})_1$  y  $|\cdot|_1 = \|\cdot\|$ . La aplicación

de dualidad entre espacios de Banach, será denotada por  $\langle \cdot, \cdot \rangle$ . El espacio dual de  $X^\alpha$  es denotado por  $X^{-\alpha}$ . Así, identificando a  $X$  con su espacio dual, tenemos que  $X^\alpha \hookrightarrow X \hookrightarrow X^{-\alpha}$ , donde la inyección es continua y con imagen densa.

Continuando con la descripción de los operadores dados en la ecuación (1), suponemos que en (1),  $B : X^1 \times X^1 \rightarrow X^{-1}$  es un operador bilineal continuo, esto es,

$$|B(\mathbf{u}, \mathbf{v})|_{-1} \leq \|B\|_1 \|\mathbf{u}\| \|\mathbf{v}\|, \quad \forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in X^1,$$

y suponemos que existen extensiones continuas  $B : X \times X^1 \rightarrow X^{-2}$ ,  $B : X^1 \times X \rightarrow X^{-2}$ . Los operadores  $B_i : X^1 \rightarrow X^{-1}$ ,  $i = 1, 2$ , son lineales y continuos, con extensiones continuas  $B_i : X \rightarrow X^{-2}$  para  $i = 1, 2$ , respectivamente. Además, suponemos que

$$\langle B(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \mathbf{v} \rangle = 0, \quad \forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in X^1, \quad (2)$$

$$\langle B_1 \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle = 0, \quad \forall \mathbf{u} \in X^1. \quad (3)$$

Las normas de los operadores  $B$  y  $B_i$ ,  $i = 1, 2$ , con valores en  $X^{-\alpha}$  son denotadas por  $\|B\|_\alpha$  y  $\|B_i\|_\alpha$ , respectivamente. De otro lado suponemos que  $\mathbf{f}$  es una función dada, que  $\mathbf{u}_0$  es la condición inicial del problema y que  $\mathbf{u}$  es la incógnita del mismo.

El modelo (1) generaliza varias ecuaciones de la mecánica de los fluidos, como son las ecuaciones de fluidos micropolares, fluidos magneto-micropolares, ecuaciones de Boussinesq y Boussinesq generalizada, y las ecuaciones clásicas de Navier-Stokes, entre otras. Modelos relacionados a (1) han sido estudiados por varios autores, entre ellos, [3], [4], [8], [13] y [16]. En [13, pág. 113] se establece una formulación abstracta dada por la expresión

$$\begin{cases} \mathbf{u}_t + A\mathbf{u} + B(\mathbf{u}, \mathbf{u}) + R\mathbf{u} = \mathbf{f}, \\ \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0, \end{cases} \quad (4)$$

donde  $R$  es un operador lineal tal que  $A + R$  es coercitivo, y se discuten aspectos de existencia y unicidad de solución débil. En [8] se estudia el problema abstracto (4) con condiciones periódicas y se prueban resultados de existencia de soluciones periódicas fuertes. En [16] se

discutió la existencia de soluciones débiles y fuertes del modelo estacionario asociado, esto es, el problema

$$A\mathbf{u} + B(\mathbf{u}, \mathbf{u}) + B_1\mathbf{u} + B_2\mathbf{u} = \mathbf{f}, \quad (5)$$

y se analizaron propiedades cualitativas del conjunto de soluciones de (5).

En [3] se analizan algunos aspectos relativos a la existencia y unicidad de solución de (1) mediante métodos de Galerkin y resultados de compacidad en espacios de Nikolski.

En el presente artículo, analizamos varios aspectos relativos a la existencia, unicidad y comportamiento asintótico de las soluciones de (1); en particular, probamos la convergencia de las soluciones de (1) para las soluciones estacionarias del problema estacionario abstracto asociado (ecuación (5)). Además, probaremos la existencia de un atractor global para el sistema dinámico asociado a (1). Finalmente damos algunos ejemplos específicos de ecuaciones en derivadas parciales que pueden ser llevadas a la forma (1). El análisis de los resultados es basado en técnicas conocidas, principalmente en el caso de las ecuaciones de Navier-Stokes (con densidad constante), con lo cual, los resultados presentados pueden ser considerados como una generalización natural de resultados ya conocidos para ciertos modelos de las ecuaciones de la hidrodinámica.

## 2. Soluciones débiles

En esta sección presentamos la definición de solución débil para el sistema (1) y discutimos algunos resultados de existencia y unicidad de solución débil para este sistema. El método utilizado para la obtención de la solución débil es el método de Galerkin, para lo cual se hace necesario dar la formulación débil del problema y la elección de los espacios funcionales adecuados. La existencia de solución del problema variacional involucra la formulación de los problemas aproximados y la existencia, por lo menos, de soluciones locales. Para tales fines, aplicaremos el Teorema de existencia de ecuaciones diferenciales ordinarias en las condiciones de Carathéodory (Teorema 1). La existencia de solución global para las aproximaciones se garantiza mediante el Teorema de prolongación (Teorema 3). Posteriormente, las acotaciones a priori permiten obtener un candidato a ser solución. Para el proceso del paso al límite se hace necesario fortalecer las convergencias y el uso de lemas de compacidad; en nuestro caso usaremos teoremas que involucran derivadas temporales fraccionarias. Para garantizar la unicidad, será necesario fortalecer las

hipótesis sobre los operadores involucrados. Estos argumentos son estándar; sin embargo, haremos una descripción detallada de los mismos.

**2.1. Condiciones de Carathéodory.** Sea  $\Omega$  un subconjunto abierto de  $\mathbb{R}^{n+1}$  con elementos  $(t, \mathbf{x})$ ,  $t \in \mathbb{R}$  y  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ . Sea  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$  una función no necesariamente continua. Consideremos el problema de encontrar una función absolutamente continua  $\mathbf{x}(t)$  definida en algún intervalo  $I$  de la recta, tal que  $(t, \mathbf{x}(t)) \in \Omega$  para todo  $t \in I$  y

$$\mathbf{x}'(t) = f(t, \mathbf{x}(t)) \quad \text{para casi todo } t \in I. \quad (6)$$

Si dicha función  $\mathbf{x}(t)$  existe en el intervalo  $I$ , entonces se dice que  $\mathbf{x}(t)$  es una solución de (6) sobre el intervalo  $I$ . Para  $(t_0, \mathbf{x}_0) \in \Omega$ , hay asociado a (6) un problema de valor inicial

$$\begin{cases} \mathbf{x}'(t) = f(t, \mathbf{x}(t)), \\ \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \end{cases} \quad (7)$$

es decir, el problema de encontrar una solución  $\mathbf{x}(t)$  de (6) sobre  $I$  tal que  $t_0 \in I$  y  $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0$ .

Sea  $\Omega$  un subconjunto de  $\mathbb{R}^{n+1}$  y  $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ . Entonces se dice que  $f$  satisface las condiciones de Carathéodory sobre  $\Omega$  si:

- $f(t, \mathbf{x})$  es medible en  $t$  para cada  $\mathbf{x}$  fijo;
- $f(t, \mathbf{x})$  es continua en  $\mathbf{x}$  para cada  $t$  fijo;
- para cada compacto  $U \subset \Omega$  existe una función real integrable  $g_U(t)$  tal que

$$|f(t, \mathbf{x}(t))| \leq g_U(t), \quad \forall (t, \mathbf{x}(t)) \in U.$$

Un aspecto matemático bastante interesante es estudiar la existencia y prolongación de soluciones de ecuaciones diferenciales ordinarias en las condiciones de Carathéodory.

El siguiente resultado nos recuerda cuándo podemos garantizar la existencia de una solución para el problema (7). Para ello se necesita considerar el rectángulo

$$R = \{(t, \mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{n+1} : |t - t_0| \leq a, |\mathbf{x} - \mathbf{x}_0| \leq b\},$$

$a, b \in \mathbb{R}^+$ , y entonces se tiene el siguiente teorema:

**Teorema 1** (Carathéodory). ([9],[10]). *Sea  $f : R \rightarrow \mathbb{R}^n$  una función que satisface las condiciones de Carathéodory sobre  $R$ . Entonces existe una solución  $\mathbf{x}(t)$  de (7) sobre algún intervalo  $|t - t_0| \leq \beta$  ( $\beta > 0$ ).*

**Corolario 2.** *Si  $\Omega$  es un abierto en  $\mathbb{R}^{n+1}$  y  $f$  satisface las condiciones de Carathéodory sobre  $\Omega$ , entonces el problema (7) tiene solución para cualquier  $(t_0, \mathbf{x}_0) \in \Omega$ .*

Sean  $\mathbf{x}(t)$  una solución del problema (7) sobre un intervalo  $I$  y  $I \subset I_1$ ; entonces se dice que  $\mathbf{x}(t)$  tiene una prolongación hasta  $I_1$  si existe  $\mathbf{x}_1(t)$  tal que  $\mathbf{x}_1(t)$  es una solución de (7) sobre  $I_1(t)$  y  $\mathbf{x}_1(t) = \mathbf{x}(t)$  para todo  $t \in I$ .

El siguiente teorema da las condiciones que garantizan la prolongación de la solución.

**Teorema 3.** ([9],[10]). Sean  $\Omega$  un abierto acotado conexo en  $\mathbb{R}^{n+1}$  y  $f$  una función que satisface las dos primeras condiciones de Carathéodory sobre  $\Omega$ . Supongamos que existe una función integrable  $g(t)$  tal que  $|f(t, \mathbf{x})| \leq g(t)$ ,  $\forall (t, \mathbf{x}) \in \Omega$ , y sea  $\varphi$  una solución de (6) sobre el intervalo abierto  $(a, b)$ . Entonces:

i) Existen  $\varphi(a+0) = \lim_{t \rightarrow a^+} \varphi(t)$ ,  $\varphi(b-0) = \lim_{t \rightarrow b^-} \varphi(t)$ .

ii) Si  $(b, \varphi(b+0)) \in \Omega$  entonces  $\varphi$  puede ser prolongada en  $(a, b + \delta]$  para algún  $\delta > 0$ . Análogamente para el punto  $a$ .

iii)  $\varphi(t)$  puede ser prolongada en un intervalo  $(\gamma, \omega)$  tal que

$$(\gamma, \varphi(\gamma+0)), (\omega, \varphi(\omega+0)) \in \partial\Omega.$$

iv) Si  $f$  puede extenderse a la clausura  $\bar{\Omega}$  de  $\Omega$  de manera que la extensión preserve las propiedades de  $f$ , entonces  $\varphi(t)$  puede ser prolongada a un intervalo  $[\gamma, \omega]$  tal que

$$(\gamma, \varphi(\gamma+0)), (\omega, \varphi(\omega-0)) \in \partial\Omega.$$

**Corolario 4.** Sea  $\Omega = [0, T] \times \Gamma$ , donde  $0 < T < \infty$  y  $\Gamma = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : |\mathbf{x}| \leq b\}$  para algún  $b > 0$ , y sea  $f$  una función que satisface las condiciones del Teorema 3. Sea  $\varphi(t)$  una solución de

$$\begin{cases} \mathbf{x}' = f(t, \mathbf{x}), \\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, & |\mathbf{x}_0| \leq b. \end{cases}$$

Supongamos que en cualquier intervalo  $I$  donde  $\varphi(t)$  está definida, se tenga  $|\varphi(t)| \leq G$ , para todo  $t \in I$ ,  $G$  independiente de  $I$  y  $G < b$ . Entonces  $\varphi$  tiene una prolongación en  $[0, T]$ .

**2.2. Solución débil.** Si realizamos el producto entre la ecuación (1) por una función *test*  $\mathbf{v}$ , entonces motivados por la integración por partes entre 0 y  $T$ , podemos dar la siguiente definición de solución débil de (1).

**Definición 5.** Dado  $\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$ ,  $\mathbf{f}_1 \in L^2(0, T; X^{-1})$ ,  $\mathbf{f}_2 \in L^1(0, T; X)$ , decimos que  $\mathbf{u}$  es una solución débil del problema (1) con condición inicial  $\mathbf{u}_0 \in X$ , si

$\mathbf{u} \in L^2(0, T; X^1) \cap L^\infty(0, T; X)$ ,  $\mathbf{u} \in L^1(0, T; X^{-1}) + L^1(0, T; X)$  y

$$\begin{aligned} & - \int_0^T (\mathbf{u}, \mathbf{v}') dt + \int_0^T ((\mathbf{u}, \mathbf{v})) dt + \\ & + \int_0^T \langle B_0(\mathbf{u}, \mathbf{u}), \mathbf{v} \rangle dt = \int_0^T \langle \mathbf{f}_1, \mathbf{v} \rangle dt \\ & + \int_0^T \langle \mathbf{f}_2, \mathbf{v} \rangle dt + (\mathbf{u}_0, \mathbf{v}(0)), \end{aligned}$$

para todo  $\mathbf{v} \in C^1([0, T]; X) \cap C([0, T]; X^1)$ , con  $\mathbf{v}(T) = 0$ , donde  $B_0(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = B(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + B_1\mathbf{v} + B_2\mathbf{v}$ .

**Teorema 6.** Bajo las hipótesis sobre  $B$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  y si  $\|B_2\|_1 < 1$ , entonces para todo  $\mathbf{u}_0 \in X$  y para todo  $\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$ ,  $\mathbf{f}_1 \in L^2(0, T; X^{-1})$ ,  $\mathbf{f}_2 \in L^1(0, T; X)$ , el problema (1) tiene al menos una solución débil en el sentido de la Definición 5. Además  $\mathbf{u}$  es débilmente continua de  $[0, T]$  en  $X$ .

*Demostración.* El Teorema 6 generaliza el resultado de existencia de [3]. En [3] se presenta una prueba del Teorema 6 en el caso  $\mathbf{f}_2 = 0$ , a través del método de Galerkin y resultados de compacidad en espacios de Nikolski. Esto último para encontrar la convergencia fuerte de la sucesión de soluciones aproximadas, para la solución del problema infinito dimensional. En nuestro caso, usaremos resultados de compacidad que envuelven derivadas fraccionarias. Consideremos las aproximaciones de Galerkin

$$\mathbf{u}^k(t) = \sum_{i=1}^k c_{ik}(t) \mathbf{w}_i, \quad k \in \mathbb{N},$$

donde los coeficientes  $c_{ik}$  son determinados de tal manera que  $\mathbf{u}^k$  es una solución del problema de Cauchy

$$\mathbf{u}_t^k + A\mathbf{u}^k + P_k B_0(\mathbf{u}^k, \mathbf{u}^k) = P_k \mathbf{f}, \quad (8)$$

$$P_k \mathbf{u}_0 = \mathbf{u}^k(0) = \mathbf{u}_0^k, \quad (9)$$

siendo  $P_k$  la proyección ortogonal asociada con el espacio vectorial cerrado  $V_k$  generado por  $\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_k\}$ . Recordamos que como  $X^1 \subset X \subset X^{-1}$ , la proyección sobre  $X^{-1}$  se define a través de la extensión de Friedrich [6].

Nótese que (8) es equivalente con el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de la forma

$$\frac{d\mathbf{g}}{dt} = G(t, \mathbf{g}),$$

donde  $\mathbf{g} = (c_{1k}, \dots, c_{kk})$  y  $G = (G_1, \dots, G_k)$  tiene componentes

$$G_i(t, \mathbf{g}) = -\lambda_i c_{ik} - \sum_{l=1}^k \langle B_1 \mathbf{w}_l + B_2 \mathbf{w}_l, \mathbf{w}_i \rangle c_{lk} \\ - \sum_{\ell, j=1}^k \alpha_{j\ell}^{(i)} c_{\ell k} c_{jk} + \langle \mathbf{f}_1(t), \mathbf{w}_i \rangle + \langle \mathbf{f}_2(t), \mathbf{w}_i \rangle,$$

donde  $\alpha_{j\ell}^{(i)} \in \mathbb{R}$ . La condición inicial (9) es

$$c_{ik}(0) = (\mathbf{u}_0, \mathbf{w}_i), \quad i = 1, \dots, k.$$

La existencia de la solución local del problema de Cauchy (8)–(9) la garantiza el teorema de Carathéodory.

De hecho, sea  $D = [0, T] \times B$ ,  $B = \{\mathbf{g} \in \mathbb{R}^n : |\mathbf{g}| \leq b\}$ ,  $b > 0$ ,  $c_{ik}(0) \in B$ ; entonces, fijado  $\mathbf{g}$  tenemos que

$$-\lambda_i c_{ik} - \sum_{l=1}^k \langle B_1 \mathbf{w}_l + B_2 \mathbf{w}_l, \mathbf{w}_i \rangle c_{lk} - \sum_{\ell, j=1}^k \alpha_{j\ell}^{(i)} c_{\ell k} c_{jk}$$

no depende de  $t$  y  $\langle \mathbf{f}_1(t), \mathbf{v} \rangle + \langle \mathbf{f}_2(t), \mathbf{v} \rangle$ , es medible en  $t$ ,  $t \in [0, T]$ , puesto que  $\mathbf{f} \in L^2(0, T; X^{-1}) + L^1(0, T; X)$ . Consecuentemente  $G_i(t, \mathbf{g})$ ,  $i = 1, \dots, k$  es medible en  $t$  para cada  $\mathbf{g}$  fijo.

Por otro lado, fijado  $t$ , la suma  $\langle \mathbf{f}_1(t), \mathbf{v} \rangle + \langle \mathbf{f}_2(t), \mathbf{v} \rangle$ , no depende de  $\mathbf{g}$  y  $(c_{1k}, \dots, c_{kk}) = \mathbf{g} \in \mathbb{R}^k \mapsto \mathbf{u}^k = \sum_{i=1}^k c_{ik} \mathbf{w}_i \in (V_k, \Theta)$  es continua, donde  $\Theta$  es la topología fuerte,

$$\mathbf{u}^k \in (V_k, \Theta) \mapsto -\lambda_i c_{ik} - \sum_{l=1}^k \langle B_1 \mathbf{w}_l + B_2 \mathbf{w}_l, \mathbf{w}_i \rangle c_{lk} \\ - \sum_{\ell, j=1}^k \alpha_{j\ell}^{(i)} c_{\ell k} c_{jk}$$

es continua. Por lo tanto,  $G_i(t, \mathbf{g})$ ,  $i = 1, \dots, k$  es continua en  $\mathbf{g}$  para cada  $t$  fijo.

Finalmente, como  $\mathbf{g}$  varía en  $B$ , existe  $c_B > 0$  tal que

$$\left| -\lambda_i c_{ik} - \sum_{l=1}^k \langle B_1 \mathbf{w}_l + B_2 \mathbf{w}_l, \mathbf{w}_i \rangle c_{lk} - \sum_{\ell, j=1}^k \alpha_{j\ell}^{(i)} c_{\ell k} c_{jk} \right| \leq c_B,$$

$\forall \mathbf{g} \in B$ ,  $i = 1, \dots, k$ , de donde

$$|G(t, \mathbf{g})| \leq c_B + |\langle \mathbf{f}_1(t), \mathbf{w}_i \rangle| + |\langle \mathbf{f}_2(t), \mathbf{w}_i \rangle| = m_i(t),$$

$\forall (t, \mathbf{g}) \in D$ , siendo cada  $m_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, k$ , integrable en  $[0, T]$ . Así, por el Teorema de Carathéodory, existe una solución  $\mathbf{u}^k(t)$  definida en  $[0, T_k]$ ,  $0 < T_k \leq T$ . Como veremos abajo, para cualquier intervalo  $I$  donde  $\mathbf{u}^k(t)$  está definida, tenemos que

$$|\mathbf{u}^k(t)| \leq M, \quad \forall t \in I, \quad M \text{ independiente de } k.$$

Esto equivale a decir que  $|\mathbf{g}|^2 = \sum_{i=1}^k c_{ik}^2 \leq M$ . Por lo tanto, tomando  $B$  tal que  $\sqrt{M} < b$ , sigue del Corolario 4 que  $\mathbf{u}^k$  tiene prolongamiento hasta  $[0, T]$ . Así, para cada  $k$ , existe una solución  $\mathbf{u}^k$  de (8)–(9) definida en  $[0, T]$ .

*2.2.1. Estimaciones a priori:* Nótese que el problema (8)–(9) es equivalente a

$$(\mathbf{u}_t^k, \mathbf{v}) + ((\mathbf{u}^k, \mathbf{v})) = \langle \mathbf{f}_1, \mathbf{v} \rangle + \langle \mathbf{f}_2, \mathbf{v} \rangle - (B_0(\mathbf{u}^k, \mathbf{u}^k), \mathbf{v}), \\ \forall \mathbf{v} \in V_k, \quad (10)$$

$$\mathbf{u}^k(0) = P_k \mathbf{u}_0. \quad (11)$$

Tomando  $\mathbf{v} = \mathbf{u}^k$  en (10), obtenemos

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} |\mathbf{u}^k|^2 + \|\mathbf{u}^k\|^2 = \langle \mathbf{f}_1, \mathbf{v} \rangle + \langle \mathbf{f}_2, \mathbf{v} \rangle - (B_0(\mathbf{u}^k, \mathbf{u}^k), \mathbf{u}^k). \quad (12)$$

Observemos que las afirmaciones sobre los operadores  $B, B_1, B_2$ , implican

$$(B_0(\mathbf{u}^k, \mathbf{u}^k), \mathbf{u}^k) = (B_2 \mathbf{u}^k, \mathbf{u}^k),$$

y

$$-(B_2 \mathbf{u}^k, \mathbf{u}^k) + \langle \mathbf{f}_1, \mathbf{v} \rangle + \langle \mathbf{f}_2, \mathbf{v} \rangle \\ \leq |B_2 \mathbf{u}^k|_{-1} \|\mathbf{u}^k\| + |\mathbf{f}_1|_{-1} \|\mathbf{u}^k\| + |\mathbf{f}_2| \|\mathbf{u}^k\| \\ \leq \|B_2\|_1 \|\mathbf{u}^k\|^2 + \frac{\varepsilon}{2} |\mathbf{f}_1|_{-1}^2 + \frac{1}{2\varepsilon} \|\mathbf{u}^k\|^2 + |\mathbf{f}_2| \|\mathbf{u}^k\|.$$

Escogiendo  $\varepsilon = \frac{1}{1 - \|B_2\|_1} > 0$ , obtenemos

$$c \equiv 2 \left( 1 - \|B_2\|_1 - \frac{1}{2\varepsilon} \right) = 1 - \|B_2\|_1 > 0;$$

entonces, de (12) encontramos

$$\frac{d}{dt} |\mathbf{u}^k|^2 + c \|\mathbf{u}^k\|^2 \leq \varepsilon |\mathbf{f}_1|_{-1}^2 + |\mathbf{f}_2| (1 + |\mathbf{u}^k|^2),$$

y así

$$\frac{d}{dt} (1 + |\mathbf{u}^k|^2) + c \|\mathbf{u}^k\|^2 \leq \varepsilon |\mathbf{f}_1|_{-1}^2 + |\mathbf{f}_2| (1 + |\mathbf{u}^k|^2). \quad (13)$$

En particular, tenemos que

$$\frac{d}{dt} (1 + |\mathbf{u}^k|^2) \leq \varepsilon |\mathbf{f}_1|_{-1}^2 + |\mathbf{f}_2| (1 + |\mathbf{u}^k|^2). \quad (14)$$

Multiplicando (14) por  $e^{-\int_0^t |\mathbf{f}_2(s)| ds}$  obtenemos

$$\frac{d}{dt} \{ e^{-\int_0^t |\mathbf{f}_2(s)| ds} (1 + |\mathbf{u}^k|^2) \} \leq \varepsilon |\mathbf{f}_1|_{-1}^2 e^{-\int_0^t |\mathbf{f}_2(s)| ds}. \quad (15)$$

Integrando (15) de 0 a  $T$ , obtenemos

$$|\mathbf{u}^k(t)|^2 \leq 1 + |\mathbf{u}_0^k|^2 + C_1 \int_0^t |\mathbf{f}_1(s)|_{-1}^2 ds \\ + C_2 \int_0^t |\mathbf{f}_2(s)| (1 + |\mathbf{u}^k|^2) ds. \quad (16)$$

Consecuentemente, la desigualdad de Gronwall implica que

$$\{\mathbf{u}^k\}_{k \geq 1} \text{ es acotada en } L^\infty(0, T; X). \quad (17)$$

Integrando (13) de 0 a  $t \leq T$ , obtenemos que

$$\{\mathbf{u}^k\}_{k \geq 1} \text{ es acotada en } L^2(0, T; X^1). \quad (18)$$

Consecuentemente, existe una subsucesión de  $\{\mathbf{u}^k\}_{k \geq 1}$ , que la denotaremos de la misma forma  $\{\mathbf{u}^k\}_{k \geq 1}$  y  $\mathbf{u} \in L^2(0, T; X^1) \cap L^\infty(0, T; X)$  tal que cuando  $k \rightarrow \infty$ , tenemos

$$\mathbf{u}^k \rightarrow \mathbf{u} \text{ débilmente } - * \text{ en } L^\infty(0, T; X), \quad (19)$$

$$\mathbf{u}^k \rightarrow \mathbf{u} \text{ débilmente en } L^2(0, T; X^1). \quad (20)$$

Dada una función  $\phi$  de  $\mathbb{R}$  en  $X^{-1}$ , denotamos por  $\widehat{\phi}$  su transformada de Fourier y la derivada en  $t$  de orden  $\gamma$  de  $\phi$  es dada por la transformada inversa de  $(2i\pi t)^\gamma \widehat{\phi}$ , esto es

$$D_t^\gamma \widehat{\phi}(t) = (2i\pi t)^\gamma \widehat{\phi}(t).$$

Como en [14], para  $\gamma > 0$ , definimos los espacios funcionales

$$\mathfrak{F}^\gamma(\mathbb{R}; X^1, X^{-1}) = \{\phi \in L^2(\mathbb{R}; X^1) : D_t^\gamma \phi \in L^2(\mathbb{R}; X^{-1})\}.$$

El espacio  $\mathfrak{F}^\gamma(\mathbb{R}; X^1, X^{-1})$  es un espacio de Hilbert con la norma definida por:

$$\|\phi\|_{\mathfrak{F}^\gamma(\mathbb{R}; X^1, X^{-1})}^2 = \|\phi\|_{L^2(\mathbb{R}; X^1)}^2 + \left\| |t|^\gamma \widehat{\phi} \right\|_{L^2(\mathbb{R}; X^{-1})}^2.$$

Como puede ser visto en [14], si las inmersiones  $X^1 \hookrightarrow X \hookrightarrow X^{-1}$  son continuas, con  $X^1 \hookrightarrow X$  compacta, para cualquier conjunto acotado  $M$  y cualquier  $\gamma > 0$ , la inmersión del conjunto

$$\mathfrak{F}_M^\gamma(\mathbb{R}; X^1, X^{-1}) = \{\phi \in \mathfrak{F}^\gamma(\mathbb{R}; X^1, X^{-1}) : \text{soporte de } \phi \subset M\}$$

en el espacio  $L^2(\mathbb{R}; X^1)$ , es compacta.

Para poder pasar al límite en (10)–(11) cuando  $k \rightarrow \infty$  y obtener una solución  $\mathbf{u}$  del problema (4), necesitamos fortalecer las convergencias de  $\mathbf{u}^k$  para  $\mathbf{u}$ ; en verdad, necesitamos mostrar que existe una subsucesión de  $\{\mathbf{u}^k\}$  (la cual también será denotada por  $\{\mathbf{u}^k\}$ ) tal que

$$\mathbf{u}^k \rightarrow \mathbf{u} \text{ fuertemente en } L^2(0, T; X). \quad (21)$$

Para esto, siguiendo las ideas de [14], si definimos  $\widehat{\mathbf{u}}^k$  la extensión por cero de las funciones  $\mathbf{u}^k$  y denotamos la transformada de Fourier de  $\widehat{\mathbf{u}}^k$  por  $\widehat{\mathbf{u}}^k$ , mostraremos que  $\widehat{\mathbf{u}}^k$  pertenece a un conjunto acotado de  $\mathfrak{F}^\gamma(\mathbb{R}; X^1, X^{-1})$

$$(22)$$

para algún  $\gamma > 0$ , y así, usando los resultados de compacidad anteriormente mencionados, tenemos la convergencia fuerte (21).

Para probar (22), observamos que la ecuación (10) puede ser escrita como

$$\frac{d}{dt}(\widehat{\mathbf{u}}^k, \mathbf{v}) = \langle \widehat{G}^k, \mathbf{v} \rangle + (\mathbf{u}^k(0), \mathbf{v}) \delta_0 - (\mathbf{u}^k(T), \mathbf{v}) \delta_T, \quad (23)$$

$\forall \mathbf{v} \in V_k$ , donde  $\delta_0$  y  $\delta_T$  son distribuciones de Dirac en 0 y  $T$ , y  $\widehat{G}^k$  es una extensión por cero fuera de  $[0, T]$ , de

$$G^k = \mathbf{f} - A\mathbf{u}^k - B_0(\mathbf{u}^k, \mathbf{u}^k).$$

De (23) tenemos que

$$2i\pi s (\widehat{\mathbf{u}}^k, \mathbf{v}) = \langle \widehat{G}^k, \mathbf{v} \rangle + (\mathbf{u}_0^k, \mathbf{v}) - (\mathbf{u}^k(T), \mathbf{v}) \exp(-2i\pi Ts),$$

$\forall \mathbf{v} \in V_k$  siendo  $\widehat{\mathbf{u}}^k, \widehat{G}^k$  y las transformadas de Fourier de  $\widehat{\mathbf{u}}^k, \widehat{G}^k$ , respectivamente. Consecuentemente,

$$2i\pi s |\widehat{\mathbf{u}}^k(s)|^2 = \langle \widehat{G}^k(s), \widehat{\mathbf{u}}^k(s) \rangle + (\mathbf{u}_0^k, \widehat{\mathbf{u}}^k(s)) - (\mathbf{u}^k(T), \widehat{\mathbf{u}}^k(s)) \exp(-2i\pi Ts). \quad (24)$$

Como  $G^k \in L^1(0, T; X^{-1})$ , entonces

$$\sup_{s \in \mathbb{R}} |\widehat{G}^k(s)|_{-1} \leq c, \quad \forall k.$$

De (24) deducimos que

$$|s| |\widehat{\mathbf{u}}^k(s)|^2 \leq c \|\widehat{\mathbf{u}}^k(s)\| \quad (25)$$

Note que  $|\mathbf{u}^k(0)| \leq c$  y  $|\mathbf{u}^k(T)| \leq c$ .

Fijemos  $\gamma < \frac{1}{4}$ . Observemos que

$$|s|^{2\gamma} \leq c(\gamma) \frac{1 + |s|}{1 + |s|^{1-2\gamma}}, \quad \forall s \in \mathbb{R},$$

y usando (25), obtenemos

$$\int_{-\infty}^{\infty} |s|^{2\gamma} |\widehat{\mathbf{u}}^k(s)|^2 ds \leq c_1 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\|\widehat{\mathbf{u}}^k(s)\| ds}{1 + |s|^{1-2\gamma}} + c_2 \int_{-\infty}^{\infty} \|\mathbf{u}^k(s)\|^2 ds. \quad (26)$$

Usando la desigualdad de Schwarz, la identidad de Parseval y la consideración  $\gamma < \frac{1}{4}$ , podemos mostrar que las dos integrales del lado derecho de (26) convergen.

Consecuentemente, existe una subsucesión  $\mathbf{u}^{k'}$  tal que

$$\mathbf{u}^{k'} \rightarrow \mathbf{u} \text{ fuertemente en } L^2(0, T; X),$$

como queríamos demostrar.

2.2.2. *Paso al límite.* El proceso del paso al límite se realiza de manera estándar. De hecho, sea  $r \in C^1([0, T])$  una función con  $r(T) = 0$ , en (10) con  $\mathbf{v} = r(t)\mathbf{w}^i$ ,  $i \leq k$ ; tenemos entonces

$$\begin{aligned} & (\mathbf{u}_t^k, \mathbf{w}^i)r(t) + ((\mathbf{u}^k, \mathbf{w}^i))r(t) + (B_0(\mathbf{u}^k, \mathbf{u}^k), \mathbf{w}^i)r(t) \\ & = (\mathbf{f}(t), \mathbf{w}^i)r(t). \end{aligned}$$

Integrando de 0 a  $T$ , obtenemos

$$\begin{aligned} & - \int_0^T (\mathbf{u}^k(t), \mathbf{w}^i)r'(t)dt + \int_0^T ((\mathbf{u}^k(t), \mathbf{w}^i))r(t)dt + \\ & \quad + \int_0^T (B_0(\mathbf{u}^k(t), \mathbf{u}^k(t)), \mathbf{w}^i)r(t)dt \\ & = \int_0^T \{(\mathbf{f}_1(t), \mathbf{w}^i) + (\mathbf{f}_1(t), \mathbf{w}^i)\}r(t)dt + (\mathbf{u}^k(0), \mathbf{w}^i)r(0). \end{aligned} \quad (27)$$

Por la convergencia (19)–(21), cuando  $k \rightarrow \infty$  tenemos

$$\begin{aligned} & - \int_0^T (\mathbf{u}^k(t), \mathbf{w}^i)r'(t)dt \rightarrow - \int_0^T (\mathbf{u}(t), \mathbf{w}^i)r'(t)dt, \\ & \int_0^T (\mathbf{u}^k(t), \mathbf{w}^i)r(t)dt \rightarrow \int_0^T (\mathbf{u}(t), \mathbf{w}^i)r(t)dt, \\ & (\mathbf{u}^k(0), \mathbf{w}^i)r(0) = (P_k \mathbf{u}_0, \mathbf{w}^i)r(0) \rightarrow (\mathbf{u}_0, \mathbf{w}^i)r(0). \end{aligned}$$

Ahora mostraremos que cuando  $k \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned} & \int_0^T (B_0(\mathbf{u}^k(t), \mathbf{u}^k(t)), \mathbf{w}^i)r(t)dt \\ & \rightarrow \int_0^T (B_0(\mathbf{u}(t), \mathbf{u}(t)), \mathbf{w}^i)r(t)dt. \end{aligned}$$

De hecho,

$$\begin{aligned} & \int_0^T [(B_0(\mathbf{u}^k(t), \mathbf{u}^k(t)), \mathbf{w}^i)r(t) - (B_0(\mathbf{u}(t), \mathbf{u}(t)), \mathbf{w}^i)r(t)]dt \\ & \leq \int_0^T |(B_0(\mathbf{u}^k(t), \mathbf{u}^k(t)) - B_0(\mathbf{u}(t), \mathbf{u}(t))), \mathbf{w}^i)r(t)|dt \\ & \quad + \int_0^T |(B_1\mathbf{u}^k(t) - B_1\mathbf{u}(t), \mathbf{w}^i)r(t)|dt \\ & \quad + \int_0^T |(B_2\mathbf{u}^k(t) - B_2\mathbf{u}(t), \mathbf{w}^i)r(t)|dt \\ & \leq c \int_0^T |B(\mathbf{u}^k(t) - \mathbf{u}(t), \mathbf{u}^k(t))|_{-2}r(t)dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + c \int_0^T |B(\mathbf{u}(t), \mathbf{u}^k(t) - \mathbf{u}(t))|_{-2}r(t)dt \\ & + c \int_0^T |B_1(\mathbf{u}^k(t) - \mathbf{u}(t))|_{-2}r(t)dt \\ & + c \int_0^T |B_2(\mathbf{u}^k(t) - \mathbf{u}(t))|_{-2}r(t)dt \\ & \leq \tilde{c} \left( \int_0^T |\mathbf{u}^k(t) - \mathbf{u}(t)|^2 dt \right)^{1/2} \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Consecuentemente, tomando  $k \rightarrow \infty$  en (27) tenemos

$$\begin{aligned} & - \int_0^T (\mathbf{u}(t), \mathbf{w}^i)r'(t)dt + \int_0^T ((\mathbf{u}(t), \mathbf{w}^i))r(t)dt \\ & \quad + \int_0^T B_0(\mathbf{u}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{w}^i)r(t)dt \\ & = (\mathbf{u}_0, \mathbf{w}^i)r(0) + \int_0^T (\mathbf{f}(t), \mathbf{w}^i)r(t)dt. \end{aligned} \quad (28)$$

Como los elementos de  $C^1([0, T]; X) \cap C([0, T]; X^1)$  son límites de combinaciones lineales finitas de elementos de la forma  $r(\cdot)\mathbf{w}^i$ , la solución débil es obtenida de (28).  $\square$

Observemos que el hecho de que  $B(\mathbf{u}) := B(\mathbf{u}, \mathbf{u})$  aplica  $X^1$  sobre  $X^{-1}$  y la afirmación sobre  $B$  implican que

$$\|B(\mathbf{u})\|_{X^{-1}} \leq c_0 \|\mathbf{u}\|^2;$$

además, si  $\mathbf{u} \in L^2(0, T; X^1)$ , entonces  $B(\mathbf{u}) \in L^1(0, T; X^{-1})$ .

Como  $B_i : X^1 \rightarrow X^{-1}$ ,  $i = 1, 2$ , entonces  $B_i \mathbf{u} \in L^1(0, T; X^{-1})$ , consecuentemente, tenemos  $\mathbf{u}_t \in L^1(0, T; X^{-1}) + L^1(0, T; X)$ . Así  $\mathbf{u} \in C([0, T]; X^{-1})$  y la condición inicial tiene sentido. Además, note que como  $\mathbf{u} \in L^\infty(0, T; X)$  y es continua en  $[0, T]$  con valores en  $X^{-1}$ , debido al Lemma 1.4, Cap. 3 de [14]  $\mathbf{u}$  es débilmente continua con valores en  $X$ .

**2.3. Condiciones para la unicidad.** Presentaremos a continuación un resultado que da condiciones que garantizan la unicidad de la solución débil de (1).

**Teorema 7.** *Bajo las condiciones del Teorema 6, y si los operadores  $B$  y  $B_2$  satisfacen las desigualdades*

$$|(B(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \mathbf{w})| \leq c|\mathbf{u}|^{1/2}\|\mathbf{u}\|^{1/2}|\mathbf{v}|^{1/2}\|\mathbf{v}\|^{1/2}\|\mathbf{w}\| \quad (29)$$

$$|(B_2(\mathbf{u}), \mathbf{v})| \leq c|\mathbf{u}|^{1/2}\|\mathbf{u}\|^{1/2}|\mathbf{v}|^{1/2}\|\mathbf{v}\|^{1/2}, \quad (30)$$

donde  $c$  es una constante independiente de  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{w} \in X^1$ , entonces el problema (1) tiene una única solución débil en el sentido de la Definición 5.

*Demostración.* Sean  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{v}$  dos soluciones débiles de (1) y consideremos la diferencia  $\mathbf{w} = \mathbf{u} - \mathbf{v}$ . Entonces  $\mathbf{w}$  satisface la ecuación

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_t + A\mathbf{w} &= -B_1(\mathbf{w}) - B_2(\mathbf{w}) - B(\mathbf{u}, \mathbf{w}) - B(\mathbf{v}, \mathbf{w}), \\ \mathbf{w}(0) &= 0. \end{aligned}$$

Multiplicando formalmente la ecuación por  $\mathbf{w}$ , tenemos

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} |\mathbf{w}(t)|^2 + \|\mathbf{w}(t)\|^2 &= -(B_1\mathbf{w}, \mathbf{w}) - (B_2\mathbf{w}, \mathbf{w}) - \\ &= (B(\mathbf{u}, \mathbf{w}), \mathbf{w}) - (B(\mathbf{v}, \mathbf{w}), \mathbf{w}) \\ &= -(B_2\mathbf{w}, \mathbf{w}) - (B(\mathbf{w}, \mathbf{v}), \mathbf{w}). \end{aligned}$$

Usando las desigualdades (29)–(30) se tiene

$$\begin{aligned} |(B_2\mathbf{w}, \mathbf{w})| &\leq c|\mathbf{w}|\|\mathbf{w}\| \leq c_\eta|\mathbf{w}|^2 + \eta\|\mathbf{w}\|^2, \\ |(B(\mathbf{w}, \mathbf{v}), \mathbf{w})| &= |(B(\mathbf{w}, \mathbf{w}), \mathbf{v})| \leq c|\mathbf{w}|\|\mathbf{w}\|\|\mathbf{v}\| \\ &\leq c_\eta\|\mathbf{v}\|^2|\mathbf{w}|^2 + \eta\|\mathbf{w}\|^2. \end{aligned}$$

Considerando  $\eta = \frac{1}{4}$ , encontramos

$$\frac{d}{dt} |\mathbf{w}(t)|^2 + \|\mathbf{w}(t)\|^2 \leq c|\mathbf{w}(t)|^2(1 + \|\mathbf{v}(t)\|^2).$$

Integrando en el tiempo de 0 a  $t \leq T$ , obtenemos

$$|\mathbf{w}(t)|^2 + \int_0^t \|\mathbf{w}(\tau)\|^2 d\tau \leq c \int_0^t |\mathbf{w}(\tau)|^2(1 + \|\mathbf{v}(\tau)\|^2) d\tau.$$

Usando el Lema de Gronwall y utilizando el hecho de que  $\mathbf{v} \in L^2(0, T; X^1)$ , tenemos que  $\mathbf{w} = 0$  y en consecuencia  $\mathbf{u} = \mathbf{v}$ .  $\square$

### 3. Convergencia para las soluciones estacionarias

Sean  $\mathbf{f} \in X^{-1} + X$  y  $\mathbf{u}_\infty$  la solución del problema estacionario asociado con el problema (1), esto es, la solución de

$$A\mathbf{u} + B(\mathbf{u}, \mathbf{u}) + B_1\mathbf{u} + B_2\mathbf{u} = \mathbf{f}, \quad (31)$$

donde  $A$ ,  $B$ ,  $B_1$  y  $B_2$  satisfacen las condiciones dadas en la Sección 1.

Siguiendo [16] podemos demostrar que existe  $\mathbf{u}_\infty \in X^1$  desde que consideremos  $\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$ ,  $\mathbf{f}_1 \in X^{-1}$ ,  $\mathbf{f}_2 \in X$  y

$$\|\mathbf{u}_\infty\| \leq \frac{|\mathbf{f}_1|_{-1} + |\mathbf{f}_2|}{1 - \|B_2\|_1}. \quad (32)$$

Sea  $\mathbf{w} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_\infty$ . Entonces

$$\mathbf{w}_t + A\mathbf{w} = -B(\mathbf{u}, \mathbf{u}) + B(\mathbf{u}_\infty, \mathbf{u}_\infty) - B_1\mathbf{w} - B_2\mathbf{w}. \quad (33)$$

Multiplicando (33) por  $\mathbf{w}$  tenemos,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} |\mathbf{w}|^2 + \|\mathbf{w}\|^2 &= B(\mathbf{w}, \mathbf{u}_\infty, \mathbf{w}) - (B_2\mathbf{w}, \mathbf{w}) \\ &\leq \|\mathbf{w}\|^2 (\|B\|_1 \|\mathbf{u}_\infty\| + \|B_2\|_1). \end{aligned}$$

Por (32) obtenemos

$$\frac{d}{dt} |\mathbf{w}|^2 + \|\mathbf{w}\|^2 \left( (1 - \|B_2\|_1)^2 - \|B\|_1 (|\mathbf{f}_1|_{-1} + |\mathbf{f}_2|) \right) \leq 0.$$

La desigualdad de Gronwall implica que

$$|\mathbf{w}(t)|^2 \leq |\mathbf{w}(0)|^2 \exp(-\delta t), \quad \text{para } t > 0,$$

donde  $\delta = \left( (1 - \|B_2\|_1)^2 - \|B\|_1 (|\mathbf{f}_1|_{-1} + |\mathbf{f}_2|) \right)$ .

Esto significa que si  $B_2$  satisface

$$1 - \|B_2\|_1 > \sqrt{\|B\|_1 (|\mathbf{f}_1|_{-1} + |\mathbf{f}_2|)^2},$$

entonces tenemos que  $|\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_\infty(t)| \rightarrow 0$  exponencialmente cuando  $t \rightarrow \infty$  para cada solución  $\mathbf{u}(t)$  de (1).

Con esto hemos probado el siguiente teorema.

**Teorema 8.** Si  $1 - \|B_2\|_1 > \sqrt{\|B\|_1 (|\mathbf{f}_1|_{-1} + |\mathbf{f}_2|)^2}$ , entonces el problema estacionario relacionado con el problema (1) tiene una única solución  $\mathbf{u}_\infty$ . Por otra parte, si  $\mathbf{u}(t)$  es la solución única de (1), entonces

$$|\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_\infty| \leq |\mathbf{u}_0|^2 \exp(-\delta t)$$

para todo  $t > 0$ . En particular, cuando  $t \rightarrow \infty$ , la solución del problema no estacionario converge en la norma de  $X$  a la solución única del problema estacionario.

### 4. Atractor global

En esta sección probamos la existencia de un atractor global para el semigrupo  $\{S(t)\}_{t \geq 0}$  asociado al sistema (1), actuando sobre  $X$ . Este semigrupo es definido por  $S(t) : X \rightarrow X$  para cada  $t \geq 0$ , donde  $S(t)\mathbf{u}_0 = \mathbf{u}(t)$ , siendo  $\mathbf{u}(t)$  la única solución débil del problema (1) con condición inicial  $\mathbf{u}_0$ , la cual es dada por los Teoremas 6 y 7. Consideramos que la fuerza externa  $\mathbf{f}$  es independiente del tiempo y que  $\mathbf{f}(\cdot) \in X$ . Por otra parte, suponemos que los operadores  $B$ ,  $B_1$  y  $B_2$  satisfacen las desigualdades

$$\begin{cases} |(B(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \mathbf{w})| \leq c|\mathbf{u}|^{1/2}|\mathbf{A}\mathbf{u}|^{1/2}\|\mathbf{v}\|\|\mathbf{w}\|, \\ \mathbf{u} \in D(A), \mathbf{v} \in D(A^{1/2}), \mathbf{w} \in X, \end{cases} \quad (34)$$

$$|B_i(\mathbf{u}, \mathbf{v})| \leq c|\mathbf{u}|\|\mathbf{v}\|, \quad \text{para } i = 1, 2, \quad \mathbf{u}, \mathbf{v} \in X. \quad (35)$$

Un atractor es un subconjunto  $\mathcal{A}$  de un espacio de Banach  $X$  tal que:

1. Es invariante, es decir  $S(t)\mathcal{A} = \mathcal{A}$ , para todo  $t \geq 0$ .
2. Existe una vecindad abierta  $\mathcal{V}$  tal que, para todo  $\mathbf{u}$  en  $\mathcal{V}$ ,  $S(t)\mathbf{u}$  converge a  $\mathcal{A}$  cuando  $t \rightarrow \infty$ , es decir,  $\text{dist}(S(t)\mathbf{u}, \mathcal{A}) \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ .

Decimos que  $\mathcal{A}$  atrae uniformemente el conjunto  $\mathcal{B}$  si para cada  $\varepsilon > 0$  existe  $t_\varepsilon$  tal que, para  $t \geq t_\varepsilon$ ,  $S(t)\mathcal{B}$  está incluido en la unión de todas las bolas abiertas del radio  $\varepsilon$  con centro en  $\mathcal{A}$ .

Decimos que  $\mathcal{A}$  atrae conjuntos acotados si atrae uniformemente cada conjunto acotado en  $X$ .

Un atractor en  $X$  que es compacto y atrae conjuntos acotados en  $X$  se llama un atractor global.

Decimos que un conjunto  $\mathcal{B}$  en  $X$  es absorbente si para cada conjunto acotado  $\mathcal{B}_0$  en  $X$  existe  $t_1(\mathcal{B}_0)$  tal que, para todo  $t \geq t_1(\mathcal{B}_0)$ ,  $S(t)\mathcal{B}_0 \subset \mathcal{B}$ .

Para un subconjunto  $\mathcal{B}$  de  $X$  se define el conjunto  $\omega$ -límite de  $\mathcal{B}$  así:

$$\omega(\mathcal{B}) = \bigcap_{s \geq 0} \overline{\bigcup_{t \geq s} S(t)\mathcal{B}}.$$

El principal resultado de esta sección lo da el siguiente teorema.

**Teorema 9.** *Consideremos a  $\mathbf{f} \in X$  y supongamos que  $A, B, B_1, B_2$  son como en el Teorema 7, y qué además  $B, B_i$  satisfacen (34) y (35). Entonces existe un único atractor global  $\mathcal{A}$  para el semigrupo  $\{S(t)\}_{t \geq 0}$  en  $X$  asociado con el problema (1). El atractor  $\mathcal{A}$  es limitado en  $X^1$ , compacto y conexo en  $X$  y atrae conjuntos acotados en  $X$ .*

*Demostración.* Para demostrar este teorema utilizaremos el siguiente resultado.

**Teorema 10.** (Véase [13, p.p. 23].) *Sea  $X$  un espacio de Banach y  $\{S(t)\}_{t \geq 0}$  un semigrupo en  $X$  tal que para cada  $t > 0$  el operador  $S(t)$  sea continuo en  $X$ . Supóngase también que existe un subconjunto absorbente acotado  $\mathcal{B}$  en  $X$ , y que los operadores  $S(t)$  son uniformemente compactos para  $t$  grande. Entonces el conjunto  $\omega$ -límite de  $\mathcal{B}$ ,  $\mathcal{A} = \omega(\mathcal{B})$ , es un atractor compacto que atrae subconjuntos acotados en  $X$ . Este subconjunto es el atractor acotado maximal en  $X$ .*

Nótese que usando los mismos argumentos de las acotaciones a priori, podemos ver que

$$\frac{d}{dt} |\mathbf{u}|^2 + k_1 \|\mathbf{u}\|^2 \leq k_2 |\mathbf{f}|^2. \quad (36)$$

De (36), integrando de 0 a  $t$  tenemos

$$|\mathbf{u}(t)|^2 + k_1 \int_0^t \|\mathbf{u}(s)\|^2 ds \leq |\mathbf{u}_0|^2 + k_2 \int_0^t |\mathbf{f}(s)|^2 ds.$$

Así, usando (36) y la desigualdad del Gronwall, obtenemos

$$|\mathbf{u}(t)|^2 \leq e^{-k_3 t} \left\{ |\mathbf{u}_0|^2 + k_2 \int_0^t e^{k_3 s} |\mathbf{f}(s)|^2 ds \right\}.$$

En consecuencia, como  $\mathbf{f} \in X$ ,

$$|\mathbf{u}(t)|^2 \leq e^{-k_3 t} \left\{ |\mathbf{u}_0|^2 + \frac{k_2}{k_3} |\mathbf{f}|^2 (e^{k_3 t} - 1) \right\},$$

de donde,

$$|\mathbf{u}(t)|^2 \leq e^{-k_3 t} |\mathbf{u}_0|^2 + \frac{k_2}{k_3} |\mathbf{f}|^2$$

para todo  $t \geq 0$ , y así,

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} |\mathbf{u}(t)|^2 \leq \frac{k_2}{k_3} |\mathbf{f}|^2.$$

Sea  $B(0, \rho)$  una bola en  $X$  centrada en cero y de radio  $\rho > \rho_0$ ,  $\rho_0^2 = \frac{k_2}{k_3} |\mathbf{f}|^2$ . Entonces, para cada  $\mathbf{u}_0 \in X$  existe  $t_0 > 0$  tal que

$$\mathbf{u}(t) \in B(0, \rho), \quad \text{para todo } t \geq t_0. \quad (37)$$

Por otra parte, para cualquier bola  $B(0, r)$  en  $X$  existe  $t_0 = t_0(r)$  tal que (37) se cumple para toda solución con dato inicial  $\mathbf{u}_0 \in B(0, r)$ . Esto prueba la existencia de un subconjunto absorbente en  $X$  para el semigrupo  $\{S(t)\}_{t \geq 0}$ .

Mostraremos ahora que los atractores globales están contenidos en un subconjunto acotado de  $X^1$ . Esta propiedad se sigue de la existencia de un conjunto absorbente acotado en  $X^1$ . Para probar la existencia de tal conjunto, obtenemos otras estimaciones de las soluciones débiles y después aplicamos el Lema de Gronwall.

Sea  $\alpha > 0$  fijo. Tomando (36) e integrando por partes en el intervalo  $(t, t + \alpha)$ , con  $\mathbf{f} \in X$ , obtenemos

$$k_1 \int_t^{t+\alpha} \|\mathbf{u}(s)\|^2 ds \leq \alpha k_2 |\mathbf{f}|^2 + |\mathbf{u}(t)|^2.$$

Supongamos que (37) se cumple para algún  $\rho > \rho_0$ . Entonces obtenemos

$$\int_t^{t+\alpha} \|\mathbf{u}(s)\|^2 ds \leq \alpha \frac{k_2}{k_1} |\mathbf{f}|^2 + \frac{\rho^2}{k_1} \equiv \rho_1^2 \quad \text{para todo } t \geq t_0. \quad (38)$$

Usando (34)-(35) después de aplicar el producto escalar entre (1) y  $Au$ , obtenemos

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left| A^{1/2} \mathbf{u} \right|^2 + |A\mathbf{u}|^2 &\leq |\mathbf{f}| |A\mathbf{u}| + |(B(\mathbf{u}, \mathbf{u}), A\mathbf{u})| \\ &\quad + |(B_1 \mathbf{u}, A\mathbf{u})| + |(B_2 \mathbf{u}, A\mathbf{u})| \\ &\leq |\mathbf{f}| |A\mathbf{u}| + c_1 |A^{1/2} \mathbf{u}| |A\mathbf{u}|^{3/2} |\mathbf{u}|^{1/2} + c_2 \|\mathbf{u}\| |A\mathbf{u}| \\ &\leq |\mathbf{f}| |A\mathbf{u}| + \frac{1}{8} |A\mathbf{u}|^2 + c_3 |\mathbf{u}|^2 \|\mathbf{u}\|^4 + c_2 \|\mathbf{u}\| |A\mathbf{u}|. \end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left| A^{1/2} \mathbf{u} \right|^2 + \frac{1}{2} |A\mathbf{u}|^2 &\leq c_4 |\mathbf{f}|^2 + c_2 |\mathbf{u}|^2 \|\mathbf{u}\|^4 + c_5 \|\mathbf{u}\|^2 \\ &\leq c_4 |\mathbf{f}|^2 + c_6 \left( |\mathbf{u}|^2 \|\mathbf{u}\|^2 + 1 \right) \|\mathbf{u}\|^2, \end{aligned}$$

o equivalentemente,

$$\frac{d}{dt} \|\mathbf{u}\|^2 \leq g(t) \|\mathbf{u}\|^2 + c |\mathbf{f}|^2,$$

donde  $g(t)$  es una función localmente integrable. Si  $t \geq t_0$  (de modo que  $|\mathbf{u}(t)| \leq \rho$ ), de (38) tenemos

$$\int_t^{t+\alpha} \|\mathbf{u}\|^2 ds \leq \rho_1^2.$$

Por el Lema de Gronwall, encontramos

$$\|\mathbf{u}(t)\|^2 \leq \left( \rho_1^2 + \int_t^{t+\alpha} |\mathbf{f}|^2 \right) \exp \left( \int_t^{t+\alpha} g(s) ds \right),$$

para todo  $t \geq t_0 + \alpha$ . Esta desigualdad implica que el operador  $S(t)$  es uniformemente compacto para  $t$  suficientemente grande.  $\square$

**Observación 11.** En el caso general del Teorema 9, cuando  $\mathbf{f}$  depende del tiempo, podemos construir un semigrupo asociado al problema no autónomo (1), pero no en el espacio fase de la condición inicial. Debemos trabajar en un espacio de fase extendido  $X \times \{\mathbf{f}^h\}_{h \in \mathbb{R}}$ , donde  $\mathbf{f}^h(t) = \mathbf{f}(t+h)$ , y definimos la familia de operadores  $\{S(t)\}_{t \geq 0}$  por

$$S(t)(\mathbf{u}_0, \mathbf{g}) = (\mathbf{u}_{\mathbf{g}}(t, 0)\mathbf{u}_0, \mathbf{g}^t), \quad t \geq 0, \quad \mathbf{g} \in \overline{\{\mathbf{f}^h\}_{h \in \mathbb{R}}}.$$

Esta familia forma un semigrupo sobre el conjunto  $X \times \{\mathbf{f}^h\}_{h \in \mathbb{R}}$ . Aquí  $\mathbf{u}_{\mathbf{f}}(t, \tau)$  es un *proceso* asociado al problema (1).

## 5. Aplicaciones

En esta sección haremos algunos comentarios sobre aplicaciones de los resultados obtenidos en las secciones anteriores a ciertos modelos particulares de ecuaciones de evolución.

**5.1. Modelo de fluidos micropolares.** Como una aplicación de los teoremas dados anteriormente, consideramos inicialmente el modelo de fluidos micropolares. La dinámica de un fluido micropolar, en estado evolutivo, dentro de un dominio  $\Omega$  de  $\mathbb{R}^3$  se describe mediante el siguiente sistema de ecuaciones de evolución (ver por ejemplo [7], [15], [5] y referencias citadas allí).

$$\begin{cases} \mathbf{u}_t - (\nu + \nu_r) \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = 2\nu_r \operatorname{rot} \mathbf{w} + \mathbf{g}_1, \\ \mathbf{w}_t - \sigma \Delta \mathbf{w} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{w} - \beta \nabla \operatorname{div} \mathbf{w} + 4\nu_r \mathbf{w} \\ \quad = 2\nu_r \operatorname{rot} \mathbf{u} + \mathbf{g}_2, \operatorname{div} \mathbf{u} = 0. \end{cases} \quad (39)$$

Las ecuaciones (39)<sub>1</sub>, (39)<sub>2</sub> y (39)<sub>3</sub> describen las leyes de momento lineal, momento angular y conservación de masa, respectivamente; en estas ecuaciones,  $\mathbf{u} = (u_1(\mathbf{x}), u_2(\mathbf{x}), u_3(\mathbf{x}))$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$  representa la velocidad del fluido,  $p \in \mathbb{R}^3$  la respectiva presión hidrostática y  $\mathbf{w} = (w_1(\mathbf{x}), w_2(\mathbf{x}), w_3(\mathbf{x}))$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$  la velocidad angular de rotación de las partículas. Adicionalmente,  $\mathbf{g}_1$  y  $\mathbf{g}_2$  representan campos de fuerzas externas;  $\nu, \nu_r, \sigma, \beta$  son constantes positivas que describen características físicas del fluido ( $\nu$  es la usual viscosidad newtoniana del fluido,  $\nu_r$  es la viscosidad de microrrotación,  $\sigma$  y  $\beta$  son constantes que dependen de nueva viscosidades relativas a la asimetría del tensor *stress*). La densidad del fluido es considerada, sin pérdida de generalidad, igual a uno. Asumimos que  $\Omega$  es un conjunto acotado de  $\mathbb{R}^3$  con frontera suave  $\partial\Omega$ . Consideramos las condiciones de frontera  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{w} = \mathbf{0}$  sobre  $\partial\Omega$ . Observamos aquí que, para nuestro estudio, podemos suponer el caso de condiciones de frontera no nulas pero suficientemente regulares, de modo que podamos aplicar el Teorema de la traza en un espacios de Sóbolev y llevar el problema no homogéneo a un problema con condiciones de frontera nulas. Notemos que si el parámetro  $\nu_r$  es cero, el sistema (39) se reduce al sistema clásico de las ecuaciones de Navier-Stokes, y el campo de velocidad angular  $\mathbf{u}$  se torna independiente del campo de velocidad de microrrotación  $\mathbf{w}$ . Para ver detalles sobre la deducción física del modelo (39) invitamos al lector a consultar la referencia [2].

Denotamos con  $X$  el espacio de Hilbert  $H \times L^2(\Omega)^3$ , donde  $H$  es la clausura en la norma  $L^2(\Omega)^3$  del conjunto

$$\mathcal{V} = \{\mathbf{u} \in C_0^\infty(\Omega) : \operatorname{div} \mathbf{u} = 0\}.$$

La norma en  $X$  será denotada por  $|\cdot|$ .

Introducimos ahora los siguientes operadores:

$$\begin{aligned} A(\mathbf{U}) &= (-(\nu + \nu_r)P\Delta \mathbf{u}_1, -\sigma \Delta \mathbf{w}_1 - \beta \nabla \operatorname{div} \mathbf{w}_1) \\ &\equiv (A_1 \mathbf{u}_1, A_2 \mathbf{w}_1), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B(\mathbf{U}, \mathbf{V}) &= (P((\mathbf{u}_1 \cdot \nabla)\mathbf{u}_2), (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla)\mathbf{w}_2), \\ B_1(\mathbf{U}) &= (0, 0), \\ B_2(\mathbf{U}) &= (-2\nu_r \operatorname{rot} \mathbf{w}_1, -2\nu_r \operatorname{rot} \mathbf{u}_1 + 4\nu_r \mathbf{w}_1), \end{aligned}$$

para  $\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{w}_1) \in D(A)$ ,  $\mathbf{V} = (\mathbf{u}_2, \mathbf{w}_2) \in D(A)$ . El operador  $P$  denota la proyección ortogonal de  $L^2(\Omega)^3$  sobre el subespacio  $H$ ; el operador  $-P\Delta$  es el bien conocido operador de Stokes; el operador  $A$  es auto-adjunto, positivo, con dominio

$$D(A) = (W^{2,2}(\Omega)^3 \cap V) \times (W^{2,2}(\Omega)^3 \cap W_0^{2,2}(\Omega)^3),$$

donde  $W^{2,2}(\Omega)$  y  $W_0^{1,2}(\Omega)$  son los espacios de Sólbolev usuales, y  $V$  es la clausura de  $\mathcal{V}$  en la norma de  $W_0^{1,2}(\Omega)$ ;  $V$  puede ser caracterizado por  $V = \{\mathbf{u} \in W_0^{1,2}(\Omega)^3 : \operatorname{div} \mathbf{u} = 0\}$  (vea por ejemplo [13]). Denotamos  $X^\alpha = D(A^{\alpha/2})$  y  $X_i^\alpha = D(A_i^{\alpha/2})$ ,  $i = 1, 2$ . Observemos que  $X_2^\alpha = D(\Delta^{\alpha/2})$ .

Con estas notaciones, el sistema (39) toma la forma (1) con  $\mathbf{f} = (\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2)$ .

Podemos verificar que los operadores  $A$ ,  $B$ ,  $B_1$  y  $B_2$  satisfacen las condiciones descritas en la Sección 1.

Notemos en particular que  $(P((\mathbf{u}_1 \cdot \nabla)\mathbf{u}_2), \mathbf{u}_2) = 0$  y  $((\mathbf{u}_1 \cdot \nabla)\mathbf{w}_2, \mathbf{w}_2) = 0$ , y así  $(B(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \mathbf{v}) = 0$  para todo  $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in X^1$ .

Observemos que

$$\int_{\Omega} \operatorname{rot} \mathbf{w} \cdot \mathbf{u} dx = \int_{\Omega} \mathbf{w} \operatorname{rot} \mathbf{u} dx, \quad (40)$$

y que para cualesquiera  $\mathbf{w} \in W_0^{1,2}(\Omega)$ ,  $\mathbf{u} \in V$ ,

$$\begin{cases} \int_{\Omega} |\operatorname{rot} \mathbf{w}|^2 dx = \int_{\Omega} |\nabla \mathbf{w}|^2 dx & \text{y} \\ \int_{\Omega} |\operatorname{rot} \mathbf{u}|^2 dx = \int_{\Omega} |\nabla \mathbf{u}|^2 dx. \end{cases} \quad (41)$$

De (40), (41) y la desigualdad de Schwartz concluimos que

$$4\nu_r (\operatorname{rot} \mathbf{w}, \mathbf{u}) \leq 4\nu_r |\mathbf{w}|^2 + \nu_r \|\mathbf{u}\|^2.$$

Ahora, por la desigualdad de Poincaré

$$\|\mathbf{u}\| \leq \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \|\mathbf{u}\|, \quad \text{para todo } \mathbf{u} \in V,$$

donde  $\lambda_1 > 0$  es el primer autovalor del operador de Stokes, y obtenemos la acotación

$$(\mathbf{g}_1, \mathbf{u}) \leq \frac{2}{\sqrt{\lambda_1}} |\mathbf{g}_1|_{-1} \|\mathbf{u}\| \leq \frac{1}{\nu \lambda_1} |\mathbf{g}_1|_{-1}^2 + \nu \|\mathbf{u}\|^2.$$

Consecuentemente,

$$\frac{d}{dt} |\mathbf{u}(t)|^2 + (\nu + \nu_r) \|\mathbf{u}(t)\|^2 \leq 4\nu_r |\mathbf{w}(t)|^2 + \frac{1}{\nu \lambda_1} |\mathbf{g}_1(t)|_{-1}^2. \quad (42)$$

Similarmente,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} |\mathbf{w}(t)|^2 + (c_a + c_d) \|\mathbf{w}(t)\|^2 + 4\nu_r |\mathbf{w}(t)|^2 \\ \leq \nu_r \|\mathbf{u}(t)\|^2 + \frac{1}{(c_a + c_d)\lambda} |\mathbf{f}_2(t)|_{-1}^2. \end{aligned} \quad (43)$$

De (42) y (43) obtenemos

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (|\mathbf{u}(t)|^2 + |\mathbf{w}(t)|^2) + c_1 (\|\mathbf{u}(t)\|^2 + \|\mathbf{w}(t)\|^2) \\ \leq c_2 (|\mathbf{f}_1(t)|_{-1}^2 + |\mathbf{f}_2(t)|_{-1}^2), \end{aligned}$$

que equivale a la desigualdad (13). En consecuencia, se obtiene la existencia de solución débil dada por el Teorema 6. Las condiciones de los Teoremas 7, 8 y 9 también se verifican. Omitimos aquí los detalles.

**Observación 12.** En el análisis anterior sobre el modelo (39), por simplicidad en la notación, hemos considerado  $\mathbf{f} \in L^2(0, T; X^{-1})$ ; sin embargo, los resultados son válidos si consideramos  $\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2$ , con  $\mathbf{f}_1 = (\mathbf{g}_1^1, \mathbf{g}_2^1)$ ,  $\mathbf{f}_2 = (\mathbf{g}_1^2, \mathbf{g}_2^2)$ , donde  $\mathbf{f}_1 \in L^2(0, T; X^{-1})$  y  $\mathbf{f}_2 \in L^1(0, T; X)$  conforme al Teorema 6.

## 5.2. Ecuaciones de evolución de Navier-Stokes.

Como otra aplicación de los Teoremas 6, 7, 8 y 9, consideramos las ecuaciones clásica de Navier-Stokes en estado evolutivo:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_t - \nu \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{g}, & \text{en } \Omega, \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, & \text{en } \Omega, \\ \mathbf{u} = \phi, & \text{sobre } \partial\Omega, \end{cases} \quad (44)$$

donde  $\mathbf{g} \in H$ ,  $\phi \in W^{1,3/2}(\partial\Omega)$  (el espacio de las funciones traza en  $W^{1,2}(\Omega))^3$  con  $\int_{\partial\Omega} \phi \cdot \mathbf{n} ds = 0$ ,  $\mathbf{n}$  siendo la normal exterior sobre  $\partial\Omega$ ). Notemos que si consideramos  $\phi \in W^{1,3/2}(\partial\Omega)$ , para todo  $\delta > 0$  existe una extensión  $G$  de  $\phi$ , con  $G \in W^{2,2}(\Omega)$ ,  $\operatorname{div} \phi = 0$ ,  $G = \phi$  sobre  $\partial\Omega$ , tal que para todo  $\mathbf{u} \in V$ ,

$$\begin{aligned} |(\mathbf{u} \cdot \nabla G, \mathbf{u})| &\leq \delta \|\phi\|_{W^{1,3/2}(\partial\Omega)} \|\nabla \mathbf{u}\|^2, \\ \|G\|_{W^{2,2}(\Omega)} &\leq C(\delta) \|\phi\|_{W^{1,3/2}(\partial\Omega)}. \end{aligned}$$

Sea  $U = \mathbf{u} - G$  y definamos

$$\begin{aligned} AU &= -\nu P \Delta U, \\ B(U, U) &= P((U \cdot \nabla)U), \\ \mathbf{f} &= \mathbf{g} + \nu \Delta G - (G \cdot \nabla)G, \\ B_2 U &= P((U \cdot \nabla)G) + P((G \cdot \nabla)U), \\ B_1 U &= 0. \end{aligned}$$

Usamos la notación  $P$  para indicar el operador proyección  $P : L^2(\Omega) \rightarrow H$ . Con estas notaciones, obtenemos

para el problema (44) la ecuación abstracta

$$U_t + AU + B(U, U) + B_1U + B_2U = \mathbf{f},$$

y sobre esta ecuación aplicamos los resultados estudiados en las secciones anteriores.

**5.3. Otros modelos.** Existen otros modelos de la hidrodinámica que pueden llevarse a la forma (1). A continuación mencionamos dos de ellos: el modelo de la ecuaciones de Boussinesq y el sistema de fluidos magneto-micropolares. A continuación haremos una breve descripción de dichos modelos.

*5.3.1. Ecuaciones de Boussinesq.* Consideremos un fluido viscoso dentro de un dominio  $\Omega$  de  $\mathbb{R}^n$ ,  $n \geq 2$ . Las ecuaciones de Boussinesq para convección, en el caso evolutivo, describen la evolución de la temperatura y el campo de velocidad de un fluido newtoniano viscoso incompresible. Debido a la aproximación de Boussinesq (**Chandrasekhar** [1]), variaciones de la densidad pueden ser ignoradas excepto en el término gravitacional, en el que tales variaciones pueden ser asumidas como proporcionales a las variaciones de temperatura. Entonces, en forma adimensional, la relación entre el campo de velocidad  $\mathbf{u}(x, t) \in \mathbb{R}^n$ , la presión  $p(x, t) \in \mathbb{R}$  y la temperatura  $\theta(x, t) \in \mathbb{R}$ , puede ser descrita por el siguiente sistema de ecuaciones en derivadas parciales:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nu \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \beta \theta \mathbf{g} + \mathbf{f}_1, & x \in \Omega \times (0, T), \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, & x \in \Omega \times (0, T), \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} - \chi \Delta \theta + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \theta = \mathbf{f}, & x \in \Omega \times (0, T), \end{cases} \quad (45)$$

donde  $\mathbf{g}$  representa el campo gravitacional en  $x$ ,  $\mathbf{f}$  la referencia de temperatura y  $\mathbf{f}_1$  otra fuerza externa que actúa en el sistema;  $\rho$ ,  $\nu$ ,  $\beta$  y  $\chi$  son constantes físicas positivas que representan, respectivamente, la densidad, la viscosidad cinemática, el coeficiente de expansión de volumen y la conductancia térmica. La ecuación (45)<sub>1</sub> representa la ley de conservación de momento, la ecuación (45)<sub>2</sub> indica la incompresibilidad del fluido y la ecuación (45)<sub>3</sub> representa la ecuación de evolución para la temperatura. Esta ecuación se completa debidamente con

las respectivas condiciones iniciales y de frontera. El modelo estacionario asociado es considerado en [17] y referencias allí citadas.

*5.3.2. Sistemas de fluidos magneto-micropolares.* Consideraremos el sistema de fluidos magneto-micropolares sobre  $\Omega$  [7]. Este sistema es acoplado entre el sistema de fluidos micropolares (39), con la fuerza de Lorentz, ecuaciones de Maxwell y ley de Ohm, y viene dado por el siguiente problema de valor inicial y de frontera:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_t - (\nu + \chi) \Delta \mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla \pi + \frac{1}{\mu} B \times \operatorname{rot} B = \chi \operatorname{rot} \omega, & \text{en } \Omega \times (0, T), \\ \mathbf{w}_t - \gamma \Delta \mathbf{w} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{w} + 2\chi \mathbf{w} - (\alpha + \beta) \nabla \operatorname{div} \mathbf{w} = \chi \operatorname{rot} \mathbf{u}, & \text{en } \Omega \times (0, T), \\ B_t + \frac{1}{\sigma \mu} \operatorname{rot} \operatorname{rot} B - \operatorname{rot}(\mathbf{u} \times B) = 0, & \text{en } \Omega \times (0, T), \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0, \quad \operatorname{div} B = 0, & \text{en } \Omega \times (0, T), \\ \mathbf{u} = 0, \quad \mathbf{w} = 0, \quad \mathbf{n} \cdot B = 0, \quad \operatorname{rot} B \times \mathbf{n} = 0, & \text{sobre } \partial \Omega \times (0, T), \\ \mathbf{u}(x, 0) = \mathbf{u}_0, \quad \mathbf{w}(x, 0) = \mathbf{w}_0, \quad B(x, 0) = B_0, & \text{en } \Omega, \end{cases} \quad (46)$$

donde  $\Omega$  es un dominio en  $\mathbb{R}^3$  y  $\mathbf{u}$ ,  $\pi$  y  $\mathbf{w}$  representan, respectivamente, la velocidad angular, la presión y la velocidad microrrotacional de las partículas,  $B = (B_1, B_2, B_3)$  es la densidad del flujo magnético y  $\mathbf{n}$  es el vector normal unitario sobre  $\partial \Omega$ ; las constantes  $\chi$ ,  $\nu$ ,  $\mu$ ,  $\gamma$ ,  $\sigma$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son positivas y representan las características físicas del fluido; en particular,  $\mu > 0$  es

la permeabilidad y  $\sigma > 0$  es la conductividad del fluido.

**Agradecimientos:** Este trabajo fue financiado parcialmente por el DIF-Ciencias de la Universidad Industrial de Santander. **E. J. Villamizar-Roa** agradece a Colciencias el apoyo financiero dado en el marco del Proyecto BID, III etapa.-

## Referencias

- [1] **S. Chandrasekhar**, *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford at the Clarendon Press, (1961).
- [2] **A. C. Eringen**, “Theory of micropolar fluids”, *J. Math. Mech.*, **16**, 1–8, (1966).
- [3] **E. Fernández-Cara, F. Guillén-González & M. A. Rojas-Medar**, *Una formulación abstracta para algunas ecuaciones de la mecánica de los fluidos incompresibles*, 58º Seminário Brasileiro de análise, Campinas, S.P. (2003).
- [4] **D. Haragus**, *Equations du type Navier-Stokes*, Monografía matemática, No. **49**, Universitatea de Vest Timisoana, (1994).
- [5] **L. C. F. Ferreira & E. J. Villamizar-Roa**, “On the Existence and Stability of Solutions for the Micropolar Fluids in exterior domains”, *Math. Methods Appl. Sci.*, **30**, No. 10, 1185–1208, (2007).
- [6] **J. L. Lions & E. Magenes**, *Problèmes aux limites non-homogenes et applications. I, II, VI*. Dunod, Paris, (1968).
- [7] **G. Łukaszewicz**, *Micropolar Fluids. Theory and Applications, Modelling and Simulation in Science, Engineering and Technology*, Birkäuser, Boston, Basel, Berlin, (1999).
- [8] **G. Łukaszewicz, E. E. Ortega-Torres & M. A. Rojas-Medar**, “Strong periodic solutions for a class of abstract evolutions equations”, *Nonlinear Analysis, Theory and Applications*, **54** 6, 1045–1056, (2003).
- [9] **L. A. Medeiros & P. H. Rivera**, *Espaços de Sobolev e equações diferenciais parçoes*, Textos de Métodos Matemáticos, No. 9, UFRJ, (1975).
- [10] **M. Milla–Miranda**, *Prolongación de soluciones de ecuaciones diferenciales ordinarias*, Notas UFRJ, 155–171, (1980).
- [11] **J. Simon**, “Compact Sets in the Space  $L^p(0, T; B)$ ”, *Ann. Mat. Pura Appl.*, Serie IV, Vol. 146, p.p. 65–96 (1987).
- [12] **J. Simon**, *Existencia de solución del problema de Navier-Stokes con densidad variable*, Lectures at the University of Sevilla, Spain, (1989).
- [13] **T. Temam**, *Infinite Dimensional Dynamical System in Mechanics and Physics*, Second Edition, Springer-Verlag, New York, (1997).
- [14] **T. Temam**, *Navier-Stokes Equations (Revised Edition)*, North-Holland, (1979).
- [15] **E. J. Villamizar-Roa & M. A. Rodríguez-Bellido**, “Global Existence and Exponential Estability for the Micropolar Fluid”, *Mathematik and Physik ZAMP*, **58**, 1–20, (2007).
- [16] **E. J. Villamizar-Roa, M. A. Rodríguez-Bellido & M. A. Rojas-Medar**, “Some Properties of a Class of Abstract Stationary Equations”, *Nonlinear Analysis, Theory and Applications*, **64**, 2203–2214, (2006).
- [17] **E. J. Villamizar-Roa, M. A. Rodríguez-Bellido & M. A. Rojas-Medar**, “The Boussinesq System with Mixed nonsmooth Boundary Data”, *C. R. Math. Acad. Sci. Paris*, **343**, No. 3, 191–196, (2006).

Recibido el 19 de marzo de 2007

Aceptado para su publicación el 21 de diciembre de 2007

# EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE SÍNTESIS SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL BaTiO<sub>3</sub> OBTENIDO POR COPRECIPITACIÓN

Por

Edison Rivera<sup>1</sup>, Claudia Patricia Fernández-Perdomo<sup>1</sup> & Jorge Enrique Rodríguez-Páez<sup>1</sup>

## Resumen

Rivera, E., C. P. Fernández-Perdomo & J. E. Rodríguez-Páez: Efecto de los parámetros de síntesis sobre las características del BaTiO<sub>3</sub> obtenido por coprecipitación. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(126): 93-101, 2009. ISSN 0370-3908.

Las características de los polvos cerámicos sintetizados por rutas químicas están determinadas por la naturaleza de los precursores, el pH del sistema, la temperatura a la que se realizan los tratamientos térmicos, el solvente utilizado durante el proceso, principalmente. En este trabajo se determinaron las condiciones más adecuadas para sintetizar BaTiO<sub>3</sub> por el método de coprecipitación. Se consideraron, principalmente, la fase cristalina del TiO<sub>2</sub> de partida, el pH del sistema y la temperatura de tratamiento térmico y el efecto de estos parámetros sobre las características del polvo de titanato de bario obtenido. Los polvos sintetizados se caracterizaron empleando espectroscopia infrarroja (FTIR), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de transmisión (MET). Las partículas de BaTiO<sub>3</sub> obtenidas fueron nanométricas y el método de síntesis utilizado permitió garantizar la reproducibilidad de las características microestructurales y de pureza del polvo final.

**Palabras clave:** síntesis, BaTiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, coprecipitación, caracterización.

## Abstract

The characteristics of the ceramic powders synthesized by chemical routes are determined by the nature of their precursors, the pH of the system, the temperature to which are carried out the thermal treatments, the solvent used during the process, mainly. In this work, the appropriate conditions were determined to synthesize BaTiO<sub>3</sub> for the coprecipitation method. They were considered, mainly, the crystalline phase of the TiO<sub>2</sub> of departure, the pH of the system and the temperature of thermal treatment and their effect on the characteristics of the barium titanate obtained powder. The synthesized powders were characterized using infrared spectroscopy (FTIR), X-rays diffraction (DRX) and transmission electronic microscopy (TEM). The BaTiO<sub>3</sub> particles obtained were nanométricas and the synthesis method allowed to guarantee the reproducibility of the characteristics of the final powder.

**Key words:** synthesis, BaTiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, coprecipitation, characterization.

<sup>1</sup> Grupo CYTEMAC. Departamento de Física, Universidad del Cauca, Calle 5 N 4-70 Popayán, Colombia. Correos electrónicos: cpfernandez@unicauca.edu.co, edrivera@unicauca.edu.co, jnpaez@unicauca.edu.co

## 1. Introducción

El titanato de bario,  $\text{BaTiO}_3$ , es un compuesto de gran interés tecnológico como electrocerámico y posee un gran historial de aplicaciones a nivel industrial. Este óxido mixto se utiliza como capacitor cerámico de alta permitividad, transductor cerámico piezoeléctrico, termistor semiconductor, PTCR, y sensor de humedad, debido a su alta constante dieléctrica y porque exhibe interesantes propiedades semiconductoras cuando se modifica, empleando para ello aditivos adecuados (Chen W.P. *et al.*, 2007). La importancia del  $\text{BaTiO}_3$  está fundamentada en la diversificación de sus posibles aplicaciones, gracias a la versatilidad que él ofrece frente a los procesamientos a que puede ser sometido (Fernández J. F., 1990).

El continuo interés en dispositivos electrocerámicos de alta calidad y eficiencia, ha llevado al empleo de procesos de síntesis de polvos cerámicos más elaborados, concretamente por rutas químicas (Pradeep P. P., *et al.*, 1990). Convencionalmente, el  $\text{BaTiO}_3$  se obtiene propiciando reacciones en estado sólido entre  $\text{BaCO}_3$  y  $\text{TiO}_2$  (Ming X., *et al.*, 2005). Esta reacción, cuando ocurre en el aire, se puede dividir en tres etapas básicas: primero, la formación de  $\text{BaTiO}_3$  a expensas de  $\text{TiO}_2$  por difusión del bario desde el carbonato de bario; segundo, la formación de  $\text{Ba}_2\text{TiO}_4$  por la reacción del  $\text{BaCO}_3$  con el primer metatitanato formado y finalmente la transformación  $\text{Ba}_2\text{TiO}_4$  a  $\text{BaTiO}_3$  (Fernández J. F., *et al.*, 1991). La formación de fases intermedias, antes de la formación completa del titanato de bario, es apreciable. Además, la síntesis de estos materiales a altas temperaturas ocasiona la formación de polvos de  $\text{BaTiO}_3$  con tamaño de grano relativamente grande y la presencia de múltiples fases (Pradeep P. P., *et al.*, 1990). La velocidad de reacción del Ba con el Ti depende fuertemente de las características de los materiales de partida, en particular del tamaño de partícula del  $\text{TiO}_2$ , de su estado de agregación, del grado de mezclado y de la atmósfera utilizada durante la síntesis (Fernández J. F., 1990).

En este trabajo se estudió el efecto de la fase de  $\text{TiO}_2$  utilizada como precursor, anatasa y rutilo, el pH del sistema y los tratamientos térmicos sobre las características del  $\text{BaTiO}_3$  obtenido al utilizar el método de coprecipitación. Los polvos obtenidos se caracterizaron empleando espectroscopia infrarroja (FTIR), difracción de rayos X (DRX) y microscopia electrónica de transmisión, (MET).

## 2. Parte experimental

### 2.1 Síntesis de polvos cerámicos de $\text{BaTiO}_3$

Para la obtención de la materia prima, mediante el método de coprecipitación, se tomó una solución acuosa de

ácido nítrico 0.5 N ( $\text{HNO}_3$  Fisher, 69,7%), en 200mL de agua destilada, acetato de bario ( $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  Aldrich, 99%) al 0.06M y como precursores de titanio tanto la fase anatasa ( $\text{TiO}_2$  Aldrich, el cual posee una estructura cristalina mayoritaria de anatasa 99%) como la de rutilo ( $\text{TiO}_2$  obtenido por método pechini); se prepararon composiciones de estequiometría ajustada a la relación:  $\text{BaO}/\text{TiO}_2=1$ .

Para garantizar homogeneidad en el sistema se colocó a temperatura ambiente, en continua agitación (200 r.p.m.), agua acidulada a la que se le adicionó dióxido de titanio (fase anatasa o rutilo) y el  $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ . Posteriormente, se adicionó el hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$  J.T. Baker, 29,6%) a una velocidad de 0.05 ml cada 20 segundos; el sistema fue llevado hasta los pH de interés, 4.5 y 9, los cuales se determinaron previamente con base en las curvas de valoración potenciométrica (gráfica de la variación del pH respecto al volumen adicionado de precipitante). Tanto el monitoreo y registro del pH de cada una de las soluciones, como la adición del precipitante, fueron realizados utilizando el Titrino Metrohn SM 702, con electrodo de vidrio.

Para eliminar la mayor cantidad de solvente de la suspensión se usó el rotaevaporador Buchi R-124. Luego, el polvo húmedo obtenido se mantuvo a  $60^\circ\text{C}$  en una plancha durante 24 horas. El sólido resultante fue macerado, en un mortero de ágata, obteniéndose así, para el caso del sistema con  $\text{TiO}_2$  fase anatasa, un polvo de color blanco con textura fina y para el sistema con rutilo un polvo de color oscuro con textura gruesa; en ambos casos el material final fue bastante higroscópico.

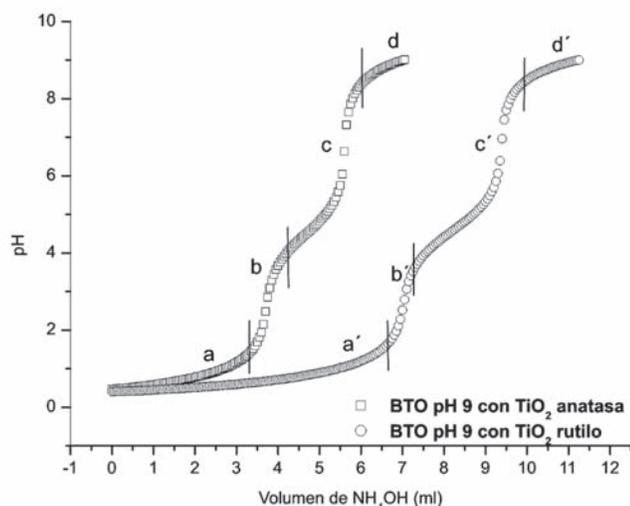
### 2.2 Caracterización de los polvos cerámicos obtenidos

Los polvos obtenidos, utilizando como precursor de titanio tanto la fase anatasa como la de rutilo, fueron caracterizados empleando Espectroscopia Infrarroja (FTIR) para conocer los grupos funcionales presentes en los polvos cerámicos sintetizados a los valores de pH de interés; para ello se empleó el espectrofotómetro Nicolet Modelo IR200. La determinación de las fases cristalinas presentes en los polvos cerámicos se realizó mediante difracción de Rayos X (DRX); el equipo empleado fue un difractómetro marca Philips PW1710, utilizando la radiación  $K\alpha$  del Cu ( $\lambda=1.54\text{\AA}$ ) en un rango de barrido entre  $10^\circ$  y  $70^\circ$  ( $2\theta$ ) a una velocidad de  $0.04^\circ\text{s}^{-1}$ . Por último, se utilizó el Microscopio Electrónico de Transmisión (MET), Jeol JEM-1200 EX, para conocer la morfología y tamaño de partícula de los polvos cerámicos sintetizados.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Valoración potenciométrica

Las curvas de valoración potenciométrica de la figura 1 se obtuvieron para una suspensión de  $\text{TiO}_2$  (anatasa o rutilo)



**Figura 1.** Curvas de valoración potenciométrica para los sistemas BTO (TiO<sub>2</sub> anatasa) y BTOR (TiO<sub>2</sub> rutilo) con una concentración de 0,06M del precursor de bario y 0,5N de HNO<sub>3</sub>.

que contenía HNO<sub>3</sub> (en una concentración de 0.5N) y 0.06M de Ba(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>, al adicionarle el precipitante (NH<sub>4</sub>OH).

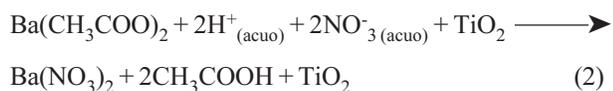
En ellas son evidentes 3 regiones si se considera la variación de la pendiente de la curva, independiente de que la fase del precursor de titanio fuera anatasa o rutilo. Como se observa, las zonas a y a' se mantienen casi constantes lo que indica que el sistema consume una gran cantidad de OH<sup>-</sup>. Las regiones b, b' y c, c' muestran un cambio más significativo en los valores del pH, mientras que para las zonas d y d' el valor de la pendiente es muy pequeño y corresponde al instante de la saturación de la disolución.

En la solución, al adicionar el HNO<sub>3</sub>, ocurre la siguiente reacción:



y fue a este sistema al que se le adicionó el TiO<sub>2</sub> para obtener la suspensión de este óxido; se observó que al adicionar el óxido al sistema su pH no variaba.

Al disolver el acetato de bario en la suspensión se favorece la formación de nitrato de bario y ácido acético, tal como se indica en la siguiente reacción:



reacción en la que se hace evidente que el intercambio del ligando NO<sub>3</sub><sup>-</sup> con el CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup> es muy eficiente.

En las regiones a y a', de la figura 1, la variación del pH no es muy notoria y debe representar, principalmente, la neutralización del ácido por el precipitante adicionado formándose el nitrato de amonio:



Entre pH 1.5 y 4.5, zonas b y b', las posibles especies químicas presentes en el sistema fueron:

Ba(NO<sub>3</sub>)(OH)<sup>-</sup>, Ba-CH<sub>3</sub>COO-OH, NH<sub>4</sub>CH<sub>3</sub>COO así como Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>COOH y NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>.

Finalmente entre pH 4.5 y 9, regiones c y c', se debieron formar compuestos que eran estables a estas condiciones del sistema. Por otro lado, dado que el catión Ba<sup>2+</sup> es grande, y tiene una carga de 2+, reacciones de hidrólisis y condensación no ocurren en la disolución y solo sería posible la formación de pares iónicos (Jolivet J, 2000).

### 3.2 Caracterización de la fase sólida de las suspensiones

Tanto el efecto de la fase de TiO<sub>2</sub> utilizada en el proceso, el pH del sistema, así como de la temperatura, sobre las características de los sólidos obtenidos, se determinó utilizando FTIR, DRX y MET.

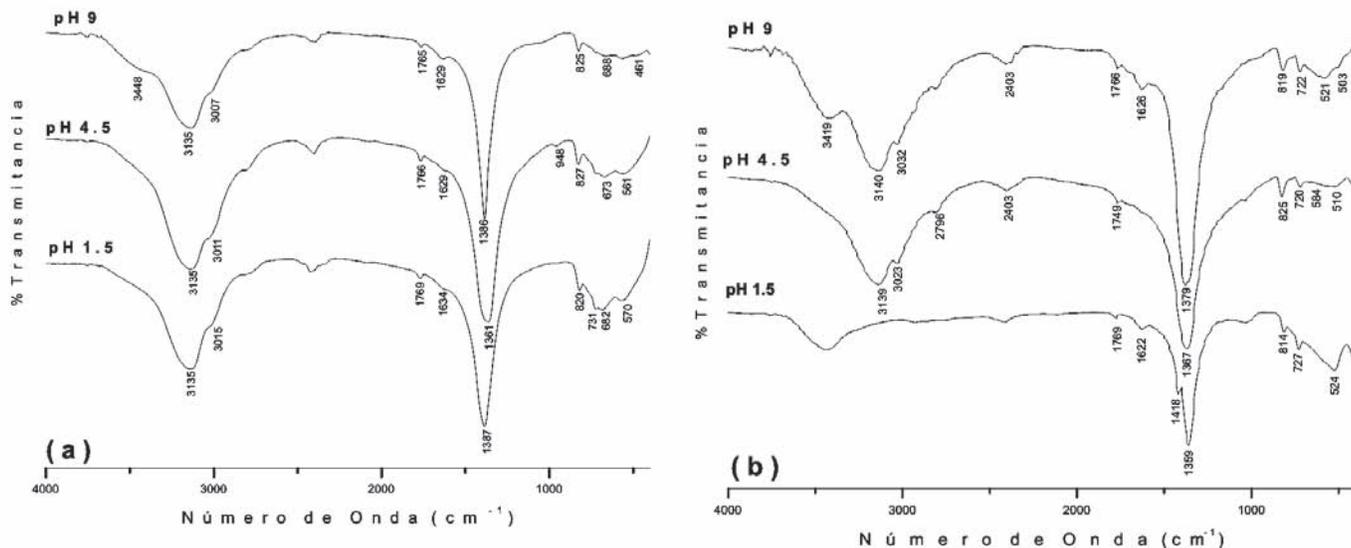
#### 3.2.1 Efecto del pH

La evolución de los grupos funcionales se determinó utilizando muestras obtenidas a diferentes valores de pH: 1.5, 4.5 y 9, valores que son representativos en la curva de la figura 1.

#### Grupos funcionales presentes en el sólido

Los espectros IR correspondientes a muestras sólidas obtenidas a diferentes valores de pH, empleando titanía en fase anatasa o fase rutilo, con una concentración 0.06M del precursor de bario y 0.5N de HNO<sub>3</sub>, se indican en la figura 2.

En los espectros de la figura 2 son evidentes las bandas ubicadas aproximadamente a 3448 y 1630 cm<sup>-1</sup> correspondientes a ν(OH) y al modo de flexión del grupo H-O-H del agua (Socrates G., 1994), la ubicada a ~ 3135 cm<sup>-1</sup> al NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Nakamoto K., 1997), el grupo -OH se puede asociar a la banda ~2422 cm<sup>-1</sup> (Nakamoto, 1997), la banda a ~1769 cm<sup>-1</sup> al carboxilo (Nakamoto K., 1997), mientras que las ubicadas a ~1387, ~820 y ~731 cm<sup>-1</sup> darían información sobre un complejo NO<sub>3</sub><sup>-</sup> unidentado y a la flexión del OH (Nakamoto K., 1997). Las bandas a ~682 y ~570 cm<sup>-1</sup> se



**Figura 2.** Espectros FTIR de muestras sólidas obtenidas a diferentes valores de pH utilizando: (a) precursor de titanio fase anatasa y (b) precursor fase rutilo, del sistema con 0,06M de precursor de bario y 0,5N de  $\text{HNO}_3$ .

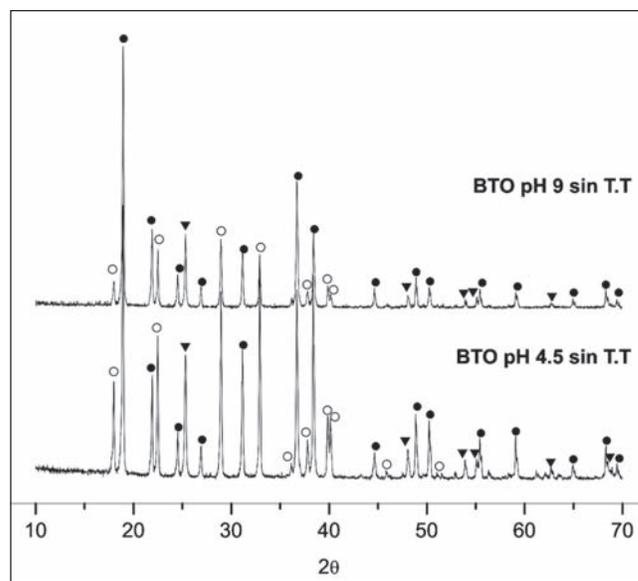
pueden asociar al  $\text{TiO}_2$  tipo anatasa, que aún no ha reaccionado (Blanco L. M., 1999) figura 2(b), y las ubicadas por debajo de  $\sim 524 \text{ cm}^{-1}$  pueden corresponder al  $\text{TiO}_2$  tipo rutilo. Se nota en los espectros de la figura 2(a) que a pH bajos se incrementó la presencia de grupos funcionales a bajo número de onda, condición importante a la hora de sintetizar el compuesto de interés porque indica la presencia de enlaces M-O ó M-OH (M=Ti, Ba) en las muestras obtenidas utilizando el  $\text{TiO}_2$  en fase anatasa; esto no se nota en los sólidos sintetizados a partir del sistema con  $\text{TiO}_2$  tipo rutilo.

Con base en los espectros IR, figura 2, se puede concluir que a pH 1.5 debe predominar el nitrato de bario frente al nitrato de amonio debido a que es muy poco el volumen de  $\text{NH}_4\text{OH}$  adicionado al sistema; el nitrato de bario presente en la suspensión debió formarse cuando se adicionó el acetato de bario a la suspensión de  $\text{TiO}_2$  que contenía ácido nítrico, tal como se indicó en la ecuación (2).

Al aumentar el volumen de  $\text{NH}_4\text{OH}$ , y alcanzar un valor de pH de 4.5, comienza a ser importante la presencia del nitrato de amonio, banda característica a  $\sim 3011$  y  $1360 \text{ cm}^{-1}$ , y debe presentarse una competencia del bario y el nitrato para unirse al amonio. Al aumentar más el contenido de  $\text{NH}_4\text{OH}$ , llevando el sistema a pH 9, vuelve a predominar el nitrato de bario, banda característica a  $\sim 1387 \text{ cm}^{-1}$ , porque al existir más  $\text{NH}_4\text{OH}$  hay más posibilidad de que  $\text{NH}_3$  reaccione con las especies de bario.

### Fases cristalinas en las muestras

Para identificar las principales fases cristalinas presentes en las muestras sintetizadas se utilizó la técnica de difracción de rayos X (DRX). Los difractogramas de rayos X de la figura 3 corresponden a muestras sólidas sin trata-



**Figura 3.** Difractogramas de rayos x correspondientes a sólidos obtenidos utilizando como precursor de titanio el  $\text{TiO}_2$  fase anatasa a pH 4.5 y pH 9. [●  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , ○  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , ▼  $\text{TiO}_2$  anatasa].

miento térmico del sistema Ba-Ti-O sintetizadas a pH 9 y pH 4.5, que son los pH correspondientes a los puntos de equivalencia de la curva de valoración potenciométrica mostrada en la figura 1. Los difractogramas indican que las principales fases cristalinas presentes en los sólidos son: Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (PDF 76-1376), NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (PDF 83-0524), y TiO<sub>2</sub> fase anatasa (PDF 84-1286).

Comparando los DRX de los sólidos sintetizados a pH 4.5 y 9, utilizando TiO<sub>2</sub> fase anatasa y sin tratamiento térmico, se nota que hay mayor evidencia de formación de nitrato de amonio a pH 4.5 que a pH 9. Además, se puede inferir que como a pH bajos predomina el NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, ello favorece la formación de nitrato de amonio, mientras que a pH altos predomina el NH<sub>3</sub>, que se volatiliza, y por tanto se facilita la formación del nitrato de bario a través del intercambio de los ligandos COO<sup>-</sup> por NO<sub>3</sub><sup>-</sup> proveniente del ácido.

### 3.2.2 Efecto de la temperatura

La figura 4 muestra los espectros FTIR de muestras de los sistemas Ba-Ti-O utilizando el TiO<sub>2</sub> fase anatasa, denominado BTO y BTOR utilizando TiO<sub>2</sub> fase rutilo, obtenidos a pH 4.5 y pH 9, que fueron sometidas a diferentes tratamientos térmicos. Se nota que a 300 y 500°C, para todos los sistemas estudiados, la banda situada alrededor de 1365-1386 cm<sup>-1</sup> se divide para dar lugar a las bandas a 1418 y 1430 cm<sup>-1</sup>, las cuales corresponden a los dos modos de tensión de un complejo de carbonato unidentado (Nakamoto K, 1997). La característica más relevante de estos espectros es la banda intensa entre 558 y 685 cm<sup>-1</sup>, principalmente a altas temperaturas, que corresponde a las vibraciones de tensión en el octaedro TiO<sub>6</sub> (Blanco L.M., 1999).

Como se evidencia en los espectros, el óxido de titanio comienza a reaccionar con el Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> a temperaturas de 300°C, en los sistemas BTO pH 9 y BTOR pH 4.5, mientras que para los otros sólidos esta reacción se hace evidente a partir de los 500°C, reacción que debe conducir a la formación del BaTiO<sub>3</sub> tal como lo indica el aumento de la intensidad relativa de la banda a bajo número de onda.

Por otro lado, para todos los sólidos analizados a 1000°C, se observa que la banda a bajas frecuencias, centrada en 537 y 542 cm<sup>-1</sup> y que es característica del BaTiO<sub>3</sub> (Nakamoto K, 1997), es la más intensa. Por otro lado, se observa una forma peculiar de esta banda para los sólidos del sistema BTO pH 4.5 y BTOR pH 9; aún para las muestras tratadas a altas temperaturas es evidente la presencia del grupo carbonato (banda a ~1430cm<sup>-1</sup>).

En la figura 5 se muestran los difractogramas de rayos x correspondientes a muestras sólidas de los sistemas BTO y BTOR, sintetizados a pH 9, y tratados térmicamente a diferentes temperaturas. Ellos indican que la principal fase cristalina presente en las muestras es el BaTiO<sub>3</sub> cúbico (PDF 75-0212); además existe BaCO<sub>3</sub> (fase Witherite PDF 71-2394). Este resultado reitera la tendencia que tiene el bario a formar compuestos con el CO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Se nota que los sólidos obtenidos utilizando TiO<sub>2</sub> fase rutilo, a pH 9, son menos propensos a formar compuestos con el CO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Este comportamiento se puede justificar considerando que el óxido tipo rutilo es más estable y se combina con el nitrato de bario a una velocidad de reacción más lenta que cuando se utiliza la fase anatasa (Fernández J. F., 1990).

Los tratamientos térmicos a los que fueron sometidas las muestras se realizaron para diferentes tiempos de duración. En la figura 5 se muestran los difractogramas correspondientes a los sólidos obtenidos y se observa que en ellos solo están presentes el BaTiO<sub>3</sub> y BaCO<sub>3</sub>. De acuerdo a estos resultados, al aumentar la temperatura de tratamiento se requiere un menor tiempo del mismo para obtener los compuestos indicados.

Sin embargo a altas temperaturas, tanto para los sólidos obtenidos del sistema con TiO<sub>2</sub> fase anatasa como del que contenía TiO<sub>2</sub> fase rutilo, se evidencia la presencia de BaCO<sub>3</sub> como impureza en el sistema. Para eliminar este carbonato de las muestras, se trató químicamente el sólido sintetizado con una solución de HCl (Mallinckrodt, 37%) al 2.5% en volumen. En la figura 6 se muestran los espectros correspondientes a muestras sometidas al lavado, durante diferentes tiempos. En ellos se observa como se reduce la intensidad de la banda asociada con el carbonato, (~1432 cm<sup>-1</sup>) a medida que se avanza con el proceso de lavado.

En la figura 7 se indica como evolucionan las fases cristalinas con el lavado; en los difractogramas se evidencia una gran reducción del carbonato de bario en la muestra lavada durante 4h.

### Morfología y tamaño de las partículas

La figura 8 muestra las micrografías obtenidas con MET del polvo cerámico sintetizado de los sistemas BTO y BTOR a pH 9. Como se puede observar, por debajo de 500°C, la muestra de BTO presenta partículas de naturaleza esferoidal y tamaño nanométrico (< 200 nm), figuras 8 (a) y (b), mientras que por encima de los 500°C, las partículas

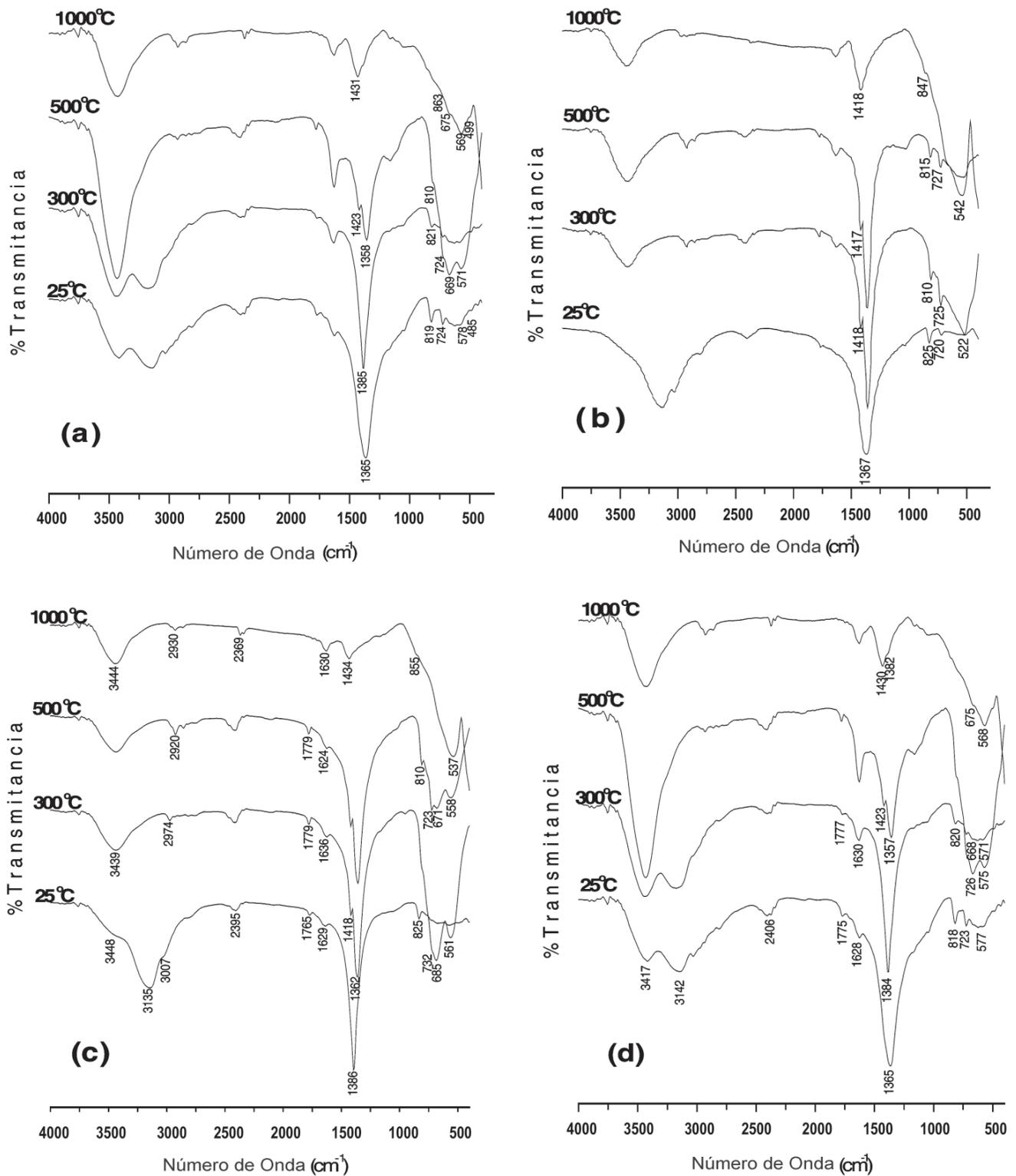
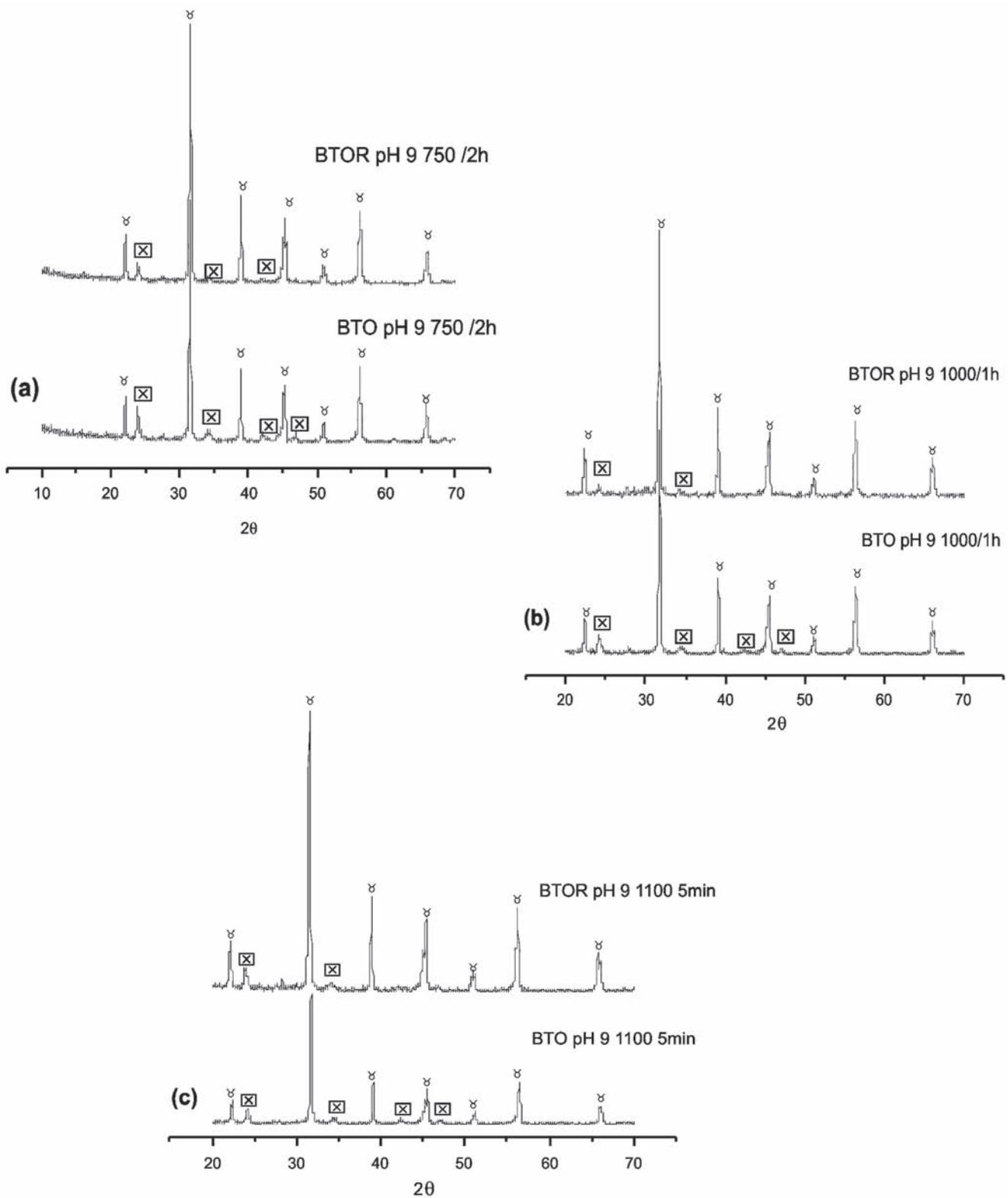


Figura 4. Espectros FTIR de muestras sólidas tratadas a diferentes temperaturas correspondientes a los sistemas (a) BTO pH 4.5, (b) BTOR pH 4.5, (c) BTO pH 9, (d) BTOR pH 9.



**Figura 5.** Difractogramas de rayos X correspondientes a muestras sólidas, a pH 9, tratadas a diferentes temperaturas (a) BTO y BTOR 750/2h, (b) BTO y BTOR 1000/1h, (c) BTO y BTOR 1100/5min [ $\gamma$   $\text{BaTiO}_3$ ,  $\boxtimes$   $\text{BaCO}_3$ ].

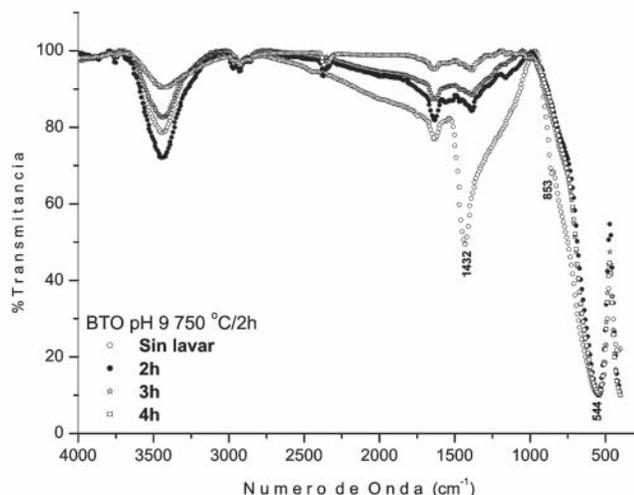


Figura 6. Espectro FTIR correspondiente a la muestra sólida, a pH 9, BTO 750°C/2h, lavada con HCL durante diferentes tiempos.

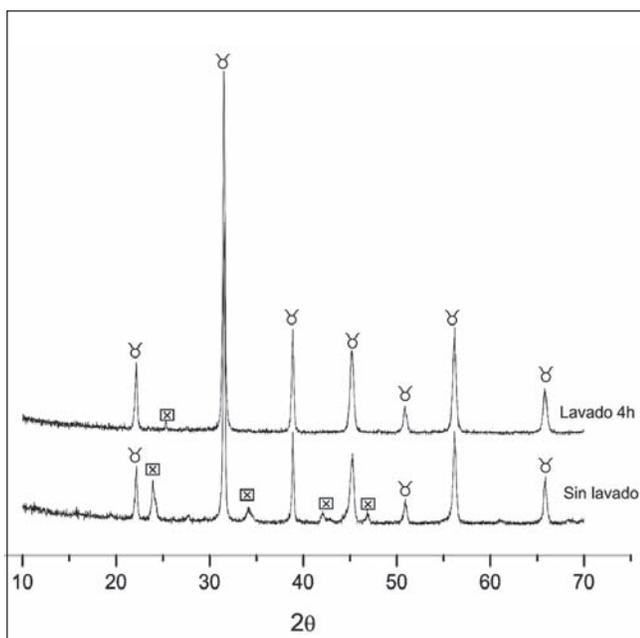


Figura 7. Difractogramas de rayos X correspondientes a la muestra sólida, a pH 9, BTO 750°C/2h, sin lavar y lavada durante 4h.

nanométricas presentan una morfología tipo tablón y una gran cantidad de agregados duros, lo que indica que la sinterización de las nanopartículas está bastante avanzada a 1000°C. Por otro lado, por debajo de 500°C la muestra de BTOR presenta agregados duros de tamaño micrométrico, figuras 8(d) y 8(e), mientras que por encima de esta temperatura la muestra presenta partículas nanométricas con una morfología tipo aguja.

## Conclusiones

De los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

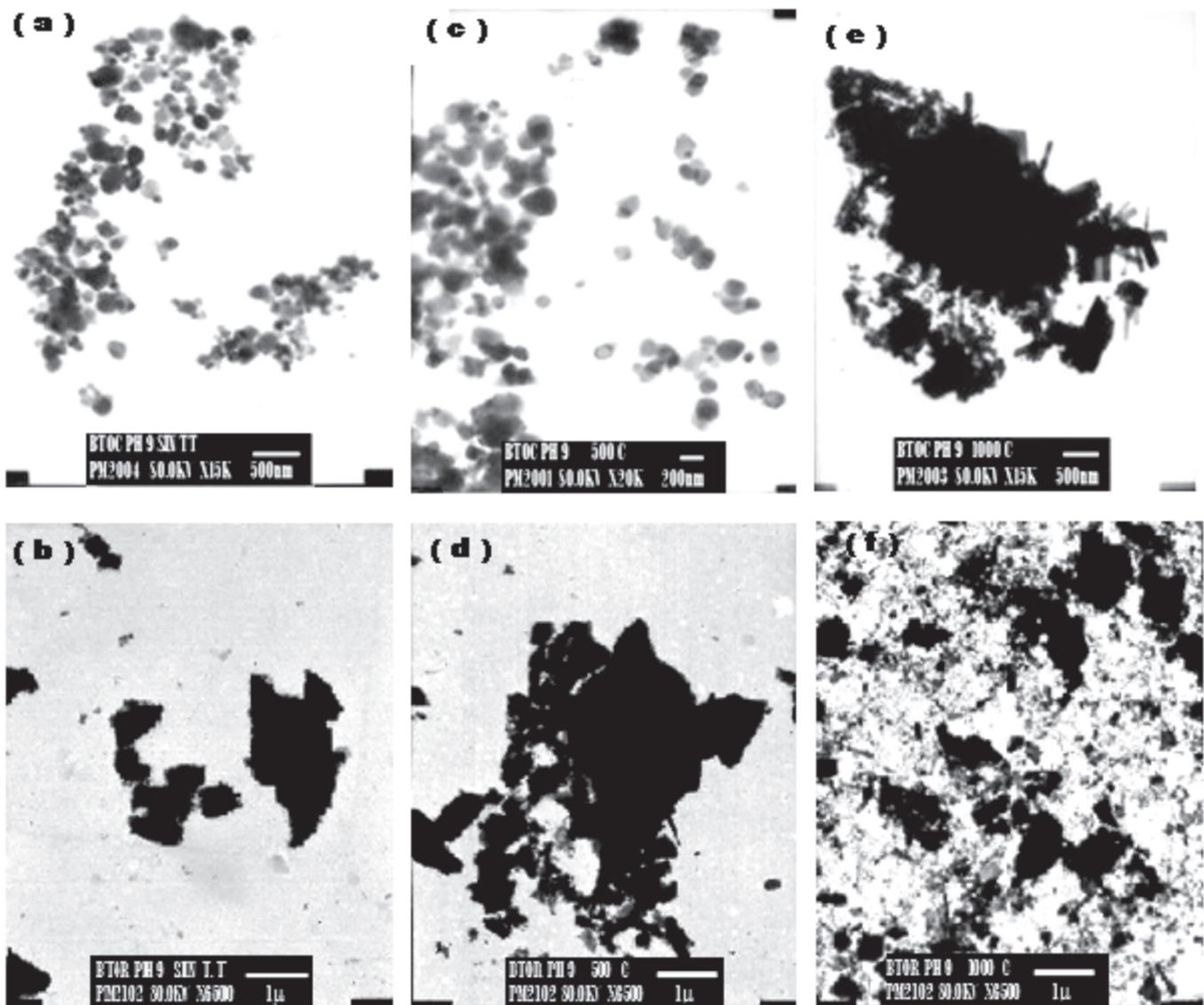
1. A pesar de que se parte del  $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ , la presencia de  $\text{NO}_3^-$  en el sistema favorece el intercambio de ligandos y la formación del  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  en la suspensión. La descomposición de  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  formado es claramente dependiente de la fase de óxido de titanio utilizado como precursor y del contacto íntimo entre las especies de bario y titanio.
2. Analizando la formación del titanato de bario, resultados de espectroscopia IR y rayos X, se observa que la fase anatasa reacciona más rápidamente que la fase rutilo a valores de pH altos durante la síntesis.
3. La evolución de la formación del  $\text{BaTiO}_3$  indica que este óxido mixto comienza a formarse a relativas bajas temperaturas ( $\sim 500^\circ\text{C}$ ), y que está acompañada por el  $\text{BaCO}_3$  como impureza. El lavado del polvo cerámico con una solución de HCl favorece la eliminación del carbonato y la obtención del  $\text{BaTiO}_3$  cúbico a baja temperatura ( $750^\circ\text{C}$ ).
4. Las condiciones más adecuadas para realizar la síntesis del  $\text{BaTiO}_3$  son: un pH 9, de una solución acuosa con una concentración 0,06 M de  $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  y 0,5N de  $\text{HNO}_3$ , utilizando titanía en fase anatasa y tratando químicamente el sólido obtenido a  $750^\circ\text{C}$  con HCl al 2.5% volumen, durante 4h.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto Fundación Banco de la República número 2348. Agradecimiento especial a la VRI de la Universidad del Cauca por la administración de los recursos del proyecto.

## Bibliografía

- Blanco, L.M., Fourlaris, G., Rand F., Riley, L. F. 1999. "Characterization of barium titanate powders: barium carbonate identification". J. Am. Ceram. Soc., vol. 82., 1777-1786.
- Chen W.P., Shen Z.J. 2008. "A strong correlation of crystal structure and Curie point of barium titanate ceramics with Ba-Ti ratio of precursor composition". Physica B., vol. 403., 660-663.
- Fernández-L. J.F. 1990. "Influencia del procesamiento cerámico en las relaciones microestructurales y propiedades del  $\text{BaTiO}_3$ ". Universidad de Madrid, tesis doctoral., C.S.I.C.



**Figura 8.** Fotografías tomadas con MET que muestran la morfología y el tamaño de partícula obtenida de los sistemas BTO pH 9 y BTOR pH 9 tratadas térmicamente durante 5 min: (a y b) sin tratamiento térmico, (c y d) 500°C, (e y f) 1000°C respectivamente.

**Fernandez J.F., Duran P., Moure C.** 1991. "Reaction Kinetics in the BaTiO<sub>3</sub> Synthesis: influence of the TiO<sub>2</sub> crystalline structure and morphology", *Ceramics today-tomorrow's Ceramics.*, Ed. P. Vincenzini, Elsevier Science Publishers, 1973-1982.

**Jolivet J.** 2000. *Metal oxide chemistry and synthesis*, Jhon Wiley & Sons, Ltd.

**Ming X., Yi-nong L., Shu-Zhe, Tong-sheng Q., Dou-You L.** 2006. "Sonochemical synthesis of monosized spherical BaTiO<sub>3</sub> particles", *Powder Technology*, vol. 161., 885-889.

**Nakamoto, K.** 1997. *Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds*, part B. 5<sup>th</sup> edition.

**Pradeep P.P., Subas H.R.** 1990. "Low-temperature synthesis and processing of electronic materials in the BaO-TiO<sub>2</sub> system", *Review, J. Mater. Sci.*, vol. 25., 1169-1183.

**Socrates, G.** *Infrared characteristics group frecuencies*, Jhon. Wiley & Sons, Ltd. 1994.

Recibido: noviembre 13 de 2008

Aceptado para su publicación: febrero 24 de 2009.



# APROXIMACIÓN *IN SILICO* A LA ESTRUCTURA 3D DE LA PROTEÍNA ANTIVENENO DM64 DE LA ZARIGÜEYA (MAMMALIA: MARSUPIALIA: DIDELPHIDAE)

Por

Juan-Fernando Duque-Osorio\*, Adalberto Sánchez\*,  
Leonardo Fierro\* & Rafael Santiago Castaño\*

## Resumen

**Duque-Osorio, J-F., A. Sánchez, L. Fierro & R. S. Castaño:** Aproximación *In silico* a la Estructura 3D de la Proteína Antiveneno DM64 de la Zarigüeya (Mammalia: Marsupialia: Didelphidae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(126): 103-123, 2009. ISSN 0370-3908.

Los accidentes por mordeduras de serpientes venenosas producen más de 50 mil muertes al año, particularmente en los trópicos donde se han convertido en un problema de salud pública. Estos accidentes producen, entre otros síntomas, hemorragias (SVMPs), mionecrosis (PLAs) y dolor, y las seroterapias convencionales son solo parcialmente efectivas y pueden producir efectos inmunes adversos. Por todo esto, recientemente se están investigando proteínas antiveneno naturales de mamíferos [DM43 (antihemorrágica) y DM64 (antimiotóxica) de la zarigüeya] que han demostrado ser más efectivas. Adicionalmente las SVMPs y PLAs venenosas tienen sus contrapartes endógenas normales no venenosas (MMPs y PLAs), y cuando el balance entre estas últimas y sus inhibidores se rompe, se producen patologías como: artritis, arterioesclerosis, asma, diabetes, choques sépticos, neoplasias, inflamaciones, psoriasis, reumatismo, etc. Por todo esto se hizo una aproximación *in silico* y por homología a la estructura 3D de DM64, con el sistema Swiss Model-Deep View. Además de obtener un modelo similar al previamente logrado por otro grupo para DM43, este proceso permitió estandarizar esta técnica de modelamiento de proteínas como una herramienta muy útil en nuestro medio por su eficiencia y bajo costo (SM-DV se puede utilizar gratuitamente).

**Palabras clave:** *Didelphis*, modelo por homología estructural, proteínas antiveneno de mamíferos (PLIs, anti-SVMP, DM64, DM43), Swiss Model-Deep View, veneno de serpientes (PLAs, SVMPs), Viperidae.

---

\* Grupo de Biología Integrativa, Escuela de Ciencias Básicas, Facultad de Salud, Universidad del Valle. Cali-Colombia. Correo electrónico: [juanferduque@gmail.com](mailto:juanferduque@gmail.com).

### Abstract

Venomous snake bite accidents produce more than 50 thousand deaths each year, particularly in the tropics where these accidents have become a public health problem. Ophidic accidents produce, amongst other symptoms, hemorrhages (SVMPs), myonecrosis (PLAs) and pain, and conventional serotherapies are only partially effective and can produce immune adverse effects. Hence natural antivenom proteins from mammals are being investigated [DM43 (antihemorrhagin) and DM64 (antimytotoxic) from opossum serum (Marsupialia: Didelphis)] which have demonstrated to be more effective. Additionally, venomous PLAs and SVMPs have their normal non-venomous endogenous counterparts (MMPs and PLAs), and when the balance between the latter and their inhibitors is broken, the following pathologies can occur: arthritis, arteriosclerosis, asthma, diabetes, septic shocks, neoplasias, inflammations, psoriasis, etc. It's because of all these reasons, that an approximation to the 3D structure of DM64 was made here, with *in silico* homology methods, using the Swiss Model-Deep View system. Besides obtaining a similar model to that previously published by another group for DM43, the work presented here allowed the standardization of the SM-DV modeling technique as a very useful tool in our countries, given its efficiency and low costs (SM-DV is freely available).

**Key words:** Mammal antivenom proteins (PLIs, anti-SVMP, DM64, DM43), *Didelphis*, structural homology model, Swiss Model-Deep View, veneno de serpientes (PLAs, SVMPs), Viperidae.

### Abreviaciones

**(En su Mayoría Provenientes del Inglés):** **3D** (tridimensional),  **$\alpha$ 1BG** ( $\alpha$ 1B-Glico Proteína), **aa** (Aminoácido), **ADN** (Acido Des-oxi-ribo-Nucleico), **BB** (Backbone: Esqueleto Proteico), **CL** (Cadena Lateral Aminoácida), **D** (Domnio), **DM** [grupo de proteínas antiveneno de serpientes extraídas de mamíferos, cuyos miembros típicos son aquellas extraídas de la Zarigüeya (Mammalia: Marsupialia: Didelphidae: *Didelphis marsupialis*): **DM40, 43, 64**], **EHA** (Enlace de Hidrógeno Apropiado), **EM** (Energy Minimization: Minimización de la energía de un modelo), **EMBL** (European Molecular Biology Laboratory: <http://www.embl.org/>), **FSIG** (Familia Supergen de las Inmunoglobulinas), **FQD** (Fix Quick and Dirty: Protocolo de arreglo de CLs en Deep View); **HL** (Homología), **MMPs** (Matrix Metallo-Proteases), **NCBI** (National Center for Biotechnology Information, National Library of Medicine, National Institutes of Health, USA: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>), **PDB** (Tipo de Archivo o Base de Datos: Protein Daba Bank: <http://www.pdb.org/>), **PLAs** (Phospholipases A), **PLIs** (Phospholipase Inhibitors), **RMSD** (Root Mean Square Distance: Raíz de la Desviación Cuadrática Media: Mide que tan desviadas están la coordenadas de un modelo por homología, con respecto a sus plantillas experimentales), **SD** (Steepest Descent: Protocolo de minimización de energía de un modelo), **SVMPs** (Snake Venom Metallo-Proteases), **SMART** (Software: Simple Modular Architectural Research Tool: <http://smart.embl.de/>), **SM-DV** (Swiss Model - Deep View: Sistema de modelamiento de proteínas por homología *in silico*, utilizado en este trabajo: <http://swissmodel.expasy.org/>).

### Introducción

Las mordeduras de serpientes producen daño tisular local y sistémico en forma de hemorragias, edema, mionecrosis y dolor (**Duque-Osorio et al.**, 2007; **Neves-Ferreira et al.**, 1997, 2000; **Thwin & Gopalakrishnakone**, 1998). De los cinco millones de accidentes ofídicos que suceden anualmente en el mundo, 50 mil son fatales, especialmente en los trópicos donde los accidentes con serpientes de la familia Viperidae son un problema de salud pública (**Gold et al.**, 2002; **Lizano et al.**, 2003; **Mattison**, 1995; **Perales & Domont**, 2002). Una de las formas convencionales de manejar el accidente ofídico es emplear inmunoglobulinas obtenidas de animales insensibilizados con los venenos o toxinas extraídas de las serpientes (**Hains & Broady**, 2000; **Lizano et al.**, 2003; **Neves-Ferreira et al.**, 1997, 2000; **Pérez & Sánchez**, 1999; **Soares et al.**, 2003; **Thwin & Gopalakrishnakone**, 1998; **Weissenberg et al.**, 1991). Pero en la búsqueda de moléculas inhibitorias más específicas, recientemente se ha visto un gran interés en estudiar la resistencia de algunos mamíferos al veneno de las serpientes (**Domont et al.**, 1991; **Duque-Osorio et al.**, 2007; **Martínez et al.**, 1999; **Pérez & Sánchez**, 1999), como se reporta para varios marsupiales (**Perales et al.**, 1994; **Melo & Suarez-Kurtz**, 1988; **Neves-Ferreira et al.**, 1997; **Soares et al.**, 1997) y algunos placentarios, como "insectívoros" (Eulipotyphla: **Omori-Satoh et al.**, 2000), roedores (**Biardi et al.**, 2000; **Martínez et al.**, 1999; **Domont et al.**, 1991) y carnívoros (**Qi et al.**, 1994). En la zarigüeya (Mammalia: Marsupialia: *Didelphis*) se han encontrado  $\alpha$ 1B-glicoproteínas (miembros de la Familia Supergen de

las Inmunoglobulinas: FSIG) con actividad antiveneno de serpientes, como DM43 (Catanese & Kress, 1992; Jurgilas *et al.*, 2003; Neves-Ferreira *et al.*, 1997, 2000, 2002; Soares *et al.*, 1997), DM64 (Rocha *et al.*, 2002), DM40 (Neves-Ferreira *et al.*, 2000). De éstas, DM40 y DM43 son antihemorrágicas y DM64 es antimiotóxica, actuando estas proteínas contra los dos efectos principales del veneno de serpientes (Chippaux & Goyffon, 1998; Pérez & Sánchez, 1999): hemorragias (SVMPs) y mionecrosis (PLAs).

Las PLAs (Gutiérrez & Ownby, 2003; Hains *et al.*, 2000, 2001; Lomonte *et al.*, 2003; Núñez *et al.*, 2001; Ohno *et al.*, 2003; Ownby *et al.*, 1998) y hemorragias (SVMPs: Bjarnason & Fox, 1994; Gutiérrez & Rucavado, 2000; Jia *et al.*, 1996; Kamiguti *et al.*, 1996, 1998; Matsui *et al.*, 2000) venosas tienen sus contrapartes endógenas normales no venenosas (PLAs y MMPs) en la mayoría de animales, y muchas condiciones patológicas son, en parte, el resultado de la disrupción del balance natural entre PLAs y MMPs, y sus inhibidores: artritis, arteriosclerosis, asma, diabetes, choques sépticos, neoplasias, procesos inflamatorios, psoriasis, y condiciones oftálmicas, ortopédicas y periodontales (Pérez & Sánchez, 1999; Soares *et al.*, 2003; Thwin *et al.*, 2000). Entonces, el estudio de los componentes principales de los venenos de serpientes (PLAs y SVMPs) y de sus moléculas inhibitoras, tiene un doble interés para la medicina (Duque-Osorio *et al.*, 2007). De forma indirecta teniendo en cuenta las patologías nombradas (Hains & Broady, 2000). De forma directa, el estudio de los venenos de serpientes y sus inhibidores es médicamente interesante, porque se necesita desarrollar esquemas terapéuticos más eficientes, ya que se ha demostrado que los PLIs y anti-SVMP naturales son más efectivos que las terapias convencionales por inmunoglobulinas, y estas últimas pueden producir efectos inmunes no deseados (Hains & Broady, 2000; Lizano *et al.*, 2003; Neves-Ferreira *et al.*, 1997, 2000; Pérez & Sánchez, 1999; Soares *et al.*, 2003; Thwin & Gopalakrishnakone, 1998; Weissenberg *et al.*, 1991).

Por ello en el trabajo que se expone a continuación, se hizo una aproximación *in silico* y por homología (basado en proteínas cuya estructura 3D esté establecida por métodos experimentales) a la estructura 3D de DM64, con el sistema Swiss Model-Deep View (SM-DV; Guex & Peitsch, 1997; Guex *et al.*, 2008; Kaplan & Littlejohn, 2001; Schwede *et al.*, 2003). Además de haber permitido la obtención de un modelo similar al previamente logrado por homología también para DM43 por Neves-Ferreira *et al.* (2002), el proceso que a continuación se resume permitió estandarizar la técnica de modelamiento de proteínas con SM-DV

como una herramienta muy útil en nuestro medio por su eficiencia y bajo costo, dado que este sistema se puede utilizar gratuitamente.

## Métodos

Para el modelamiento *in silico* de DM64 con SM-DV se realizaron los siguientes procedimientos, basados en las revisiones y tutoriales hechos por: Contreras-Moreira & Bates (2002); Contreras-Moreira *et al.* (2002); Guex & Peitsch (1997); Guex *et al.* (1999); Guex *et al.* (2008); Kaplan & Littlejohn (2001); Peitsch (2002); Pruess & Apweiler (2003); Rhodes (2000, 2008); Schwede *et al.* (2000); Schwede *et al.* (2003). Además de ser por homología, el modelo logrado en este trabajo es *in vacuo*. Se reporta el comando utilizado en DV entre paréntesis después del subtítulo, cuando sea el caso:

**División de DM64 en Regiones con el Programa EMBL/SMART:** La única secuencia aminoacídica de DM64 (gi 21309806) existente hasta la fecha en el NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) se descargó y se sometió a EMBL/SMART (<http://smart.embl.de/>) Letunic *et al.*, 2004; Schultz *et al.*, 1998) el cual, comparando con la estructura conocida para proteínas contenidas en varias bases de datos [entre otras: su propia base de datos dominios, Pfam, SCOP, NRBD (base de datos no redundante que incluye a: SWISSPROT, PDB, PIRONLY)] detecta qué tipo dominios contiene la proteína sometida. La detección de los dominios de una proteína es el primer paso para su modelamiento por homología (Contreras-Moreira & Bates, 2002) pues las proteínas multidominio siguen siendo un problema para los programas de modelamiento comparativo (Contreras-Moreira *et al.*, 2002).

**Modelos preliminares:** Teniendo en cuenta las regiones de DM64 identificados por EMBL/SMART se dividió la proteína DM64 en cinco grupos de regiones y los mismos se sometieron por separado a en el sitio web de SM. Se utilizó el "First Approach Mode" (modalidad que hace parte del Swiss Model Workspace), por medio del cual SM identifica y alinea automáticamente la secuencia problema con todo(s) el(los) péptido(s) y/o proteína(s) con estructuras 3D experimentales conocidas que tengan un mínimo de 25% de homología con la proteína a modelar (Schwede *et al.*, 2003). Estas estructuras experimentalmente serán las plantillas de modelamiento (tabla 3) con las cuales se realiza un modelo preliminar para cada grupo de regiones (cinco en total). Los modelos llegan al usuario por email en forma de un archivo de extensión pdb, visualizable en el programa Deep View (DW), el cual debe ser instalado localmente. En otras palabras, el proceso de modelamiento como tal no se realiza en el computador local del usuario,

pues los modelos son logrados por SM. Esta es la razón principal por la cual este sistema de modelamiento no requiere una infraestructura informática sofisticada. Lo que se hace localmente es la visualización y pulimiento superficial de los modelos con DV.

**Resometimiento de cada modelo a SM desde DV en modalidad de optimización (Swiss Model: Submit Modelling Request):** En contraste a lo hecho en el párrafo anterior de este protocolo (First Approach Mode) en este punto se resometieron a SM los modelos obtenidos anteriormente, ahora en modalidad optimizada desde DV, lo cual permite corregir errores de alineamiento que pudieron haber quedado incorporados en los modelos preliminares (Schwede *et al.*, 2000; Schwede *et al.*, 2003). Hasta acá, todos los procedimientos son realizados de forma automática por SM. Sin embargo hay una parte del modelamiento automático que vale la pena resaltar, y es la modelación de los bucles (loops) no conservados, pues éstas son las estructuras que más varían entre proteínas (en este caso entre la proteína problema y sus plantillas experimentales de modelamiento) por lo cual son un contribuyente mayor de imprecisión en un modelo (Schwede *et al.*, 2000). Las coordenadas de la plantilla experimental de modelamiento no pueden ser usadas para modelar inserciones o deleciones de estas plantillas con respecto a la proteína problema. Para modelar esas partes, SM construye, con la ayuda del Programa de Restricciones Espaciales (CSP por sus siglas en Inglés), un ensamblaje de fragmentos compatibles con las estructuras vecinas. De estos, el mejor bucle es escogido de acuerdo a un puntaje que toma en cuenta energía del campo de fuerza, impedimentos estéricos e interacciones favorables como formación de enlaces de hidrógeno. En aquellos casos en que el CSP no proporcione una solución satisfactoria, se busca en una biblioteca de bucles derivada de estructuras experimentales para encontrar fragmentos compatibles (Schwede *et al.*, 2003). Todo esto que ha sido expuesto sobre la modelación de bucles, es realizado también automáticamente por SM, pero se incluye aquí porque esta parte de los métodos tiene relevancia con respecto a lo expuesto en la sección de discusión. Los procedimientos que siguen son más superficiales, pero requieren más intervención del usuario.

**Pulimiento en DV de cada modelo:** Cada uno de los cinco modelos fueron pulidos localmente en DV, de la siguientes dos formas: Arreglo de Cadenas Laterales [Seleccionar: amino acidos (aa) chocantes (Select aa making clashes), aa chocantes con el esqueleto (aa making clashes with Backbone), cadenas sin enlaces de Hidrógeno apropiados (sidechains lacking proper H-Bonds) | Herramientas (Tools): Arreglar Cadenas Seleccionadas (Fix

Selected Side Chains): Arreglar Rápido y Sucio (Fix Quick and Dirty: FQDs)] y la Minimización de Energía [Herramientas (Tools: Energy Minimisation). Este proceso es llevado a cabo por los cálculos que *in vacuo* realiza el campo de fuerza Gromos 96 (Gunsteren *et al.*, 2009; Scott *et al.*, 1999; <http://www.igc.ethz.ch/gromos>) incorporado en DV. Este campo de fuerza permite medir [en Kilojoules por mol (KJ/mol)] y minimizar la energía potencial de la estructura (Rueda-Borrego, 2005; Scott *et al.*, 1999), reparando geometrías distorsionadas (Guex *et al.*, 2008) por medio de la reacomodación de ciertos átomos de aminoácidos (aa) y así lograr que el modelo se acerque más a la realidad. El cálculo y minimización de energía requiere que el extremo amino-terminal de cada modelo (y después de la proteína completa) sea protonado, adicionándose un grupo HHT, mientras que al extremo carboxi-terminal se le agrega un oxígeno (grupo OXT). Esto es hecho automáticamente por DV. De acuerdo a las pruebas y recomendaciones de los tutoriales (Guex *et al.*, 2008; Rhodes, 2008), se hicieron rondas de FQDs y “Steepest Descent” (SDs) en cantidades diferentes, de modo que cada modelo llegue a un mínimo local de energía. Cada minimización de energía se hizo con todos los aa seleccionados en el Panel de Control de DV.

**Ensamblaje de los modelos:** El primer paso para lograr este objetivo fue la extracción de cada uno de los cinco modelos de sus plantillas experimentales, pues DV no está maximizado para trabajar con proteínas multidominio con varias plantillas. Una vez lograda la extracción de los cinco modelos, los mismos fueron pre-ensamblados por medio del comando Ajustar Moléculas desde la Selección (Fit: Fit Molecules from Selection) y ensamblados con el comando Editar: Crear Capa Fusionada (Edit: Create Merged Layer), de acuerdo al siguiente orden:

- R1-2 + R2-5 = R1-5 | R3-7 + R6-8 = R3-8 | R8-10
- R1-5 | R3-8 + R8-10 = R3-10
- R1-5 + R3-10 = R1-10

El pre-ensamblaje de las parejas de modelos fue logrado gracias a los fragmentos de aminoácidos que tenían en común. Por ejemplo el final de R1-2 tiene una región de sobreposición idéntica (secuencialmente hablando) a la del comienzo de R2-5. Estas regiones en común o fragmentos de solapamiento sirvieron para pre-ensamblar parejas de modelos. En cambio el ensamblaje de cada una de las parejas se hizo teniendo en cuenta un solo fragmento de solapamiento [el que más coincidencias tenía (antes de su extracción) con su plantilla(s)], pues DV no fusiona en una sola capa dos fragmentos de solapamiento. En resumen es

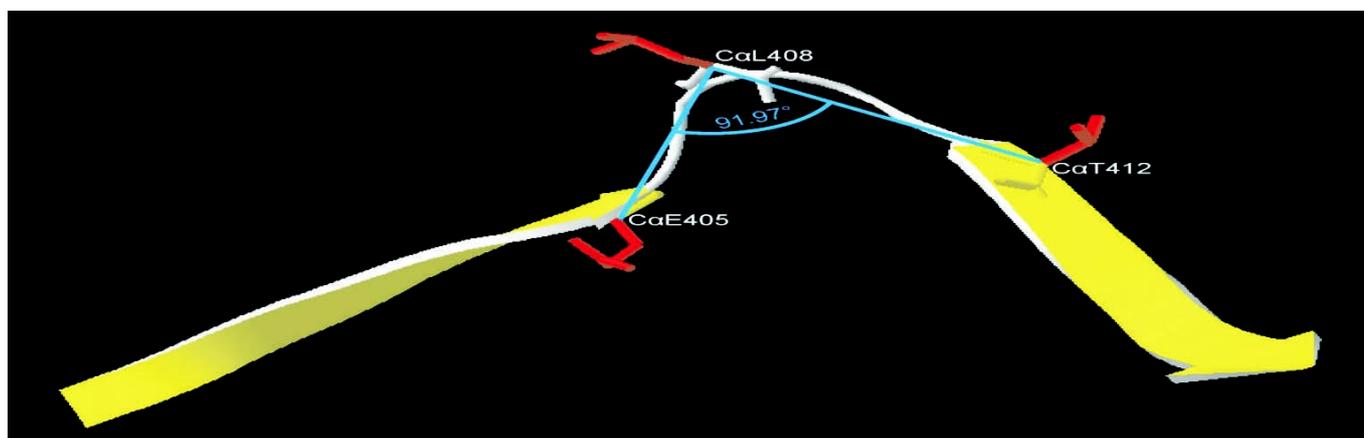
un proceso que involucra la extracción de los modelos de sus plantillas, después de lo cual sigue el pre-ensamblaje con el cual se logra posicionar un modelo con respecto al otro gracias a la coincidencia atómica posicional que se puede lograr entre los fragmentos de solapamiento. Y el ensamblaje como tal consiste en que los dos modelos sean fusionados en una sola capa (layer) para lo cual se excluye el fragmento de solapamiento que menos coincidencias mostraba con sus plantillas [esto se determina de acuerdo a los alineamientos entre cada modelo y sus plantillas, los cuales están disponibles como Material Suplementario (<http://sites.google.com/site/juanferduque/dm64-3d-in-silico-suplemento>)]. Cuando se repite este proceso de acuerdo al anterior orden, se logra una aproximación al ensamblaje completo de la proteína DM64 completa (5 dominios), así DV no esté maximizado para trabajar con proteínas multidominio.

**Pulimiento de toda la subunidad (cinco dominios) de DM64:** Siguiendo los mismos procedimientos hechos para cada modelo se pulió localmente el modelo completo obtenido utilizando los comandos Herramientas (Tools): Arreglar Cadenas Seleccionadas (Fix Selected Side Chains: FQD) y Herramientas (Tools): Minimización de Energía (EM). La cantidad de rondas FQDs y EMs (SDs) realizadas se evaluó por medio de ensayo-error de modo que se lograra la menor cantidad de cadenas laterales problemáticas y el mínimo de energía potencial posible, respectivamente.

**Mediciones adicionales:** Se midió la RMSD con el comando Ajustar: Calcular RMSD (Fit: Calculate RMSD): Root Mean Square Distance = Raíz de la Desviación Cuadrática Media. Esta medida se refiere a la distancia entre los átomos del modelo logrado y aquellos de las

plantillas experimentales. Por diferencia en la cantidad de átomos DV no pudo calcular la distancia de todos los átomos de cada modelo vs. sus plantillas. Se pudo calcular la distancia entre Carbonos Alfa (CA), y átomos del esqueleto de las proteínas (Backbone: BB). Estos cálculos fueron hechos por aparte para cada uno de los modelos de los cinco dominios de DM64, pues estos no pudieron ser ensamblados con sus plantillas respectivas, por lo cual la RMSD total de DM64 fue calculada como un promedio total (tabla 8).

También se midieron los ángulos interdominio. Neves-Ferreira *et al.* (2002) reportan un ángulo interdominio para DM43, pero no explican como lo miden, y tampoco se encontraron otras referencias que aclaren este punto. Es más, según Lehtinen *et al.* (2004), al menos para el caso de los ángulos interdominio de los dominios repetidos consensuales cortos adyacentes (SCR), la comparación de los ángulos reportados ha sido difícil porque las metodologías de cálculo son diferentes y pobremente documentadas. Se midieron entonces estos ángulos con DV, teniendo en cuenta tres puntos para cada ángulo, de acuerdo metodología ilustrada en la figura 1: Carbono  $\alpha$  del último amino-ácido de la última hebra que preceda el bucle que forma la articulación (C $\alpha$ E405 en ejemplo de figura 1), carbono alfa del aminoácido más tangencial del bucle que forma la articulación (C $\alpha$ L408 en ejemplo de figura 1) y carbono alfa del primer aminoácido de la primera hebra que sigue después del bucle articular (C $\alpha$ T412 en ejemplo de figura 1). Este ejemplo corresponde a la articulación entre el cuarto y quinto dominio del modelo de DM64 logrado aquí. Se siguió la misma metodología aún en los casos en que los dominios quedaron modelados inconexamente. Los resultados de las mediciones de estos ángulos se reportan en la tabla 9.



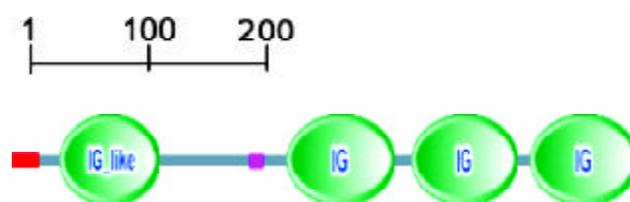
**Figura 1.** Metodología para la Medición de los Ángulos Articulares Interdominio. Medidos teniendo en cuenta tres carbonos (C $\alpha$ ) de acuerdo a metodología expuesta en el párrafo anterior. Bucle en gris claro, hebras en amarillo, cadenas laterales en rojo, y ángulo articular interdominio en azul.

## Resultados

**División de DM64 en Regiones con el Programa EMBL/SMART:** Se abordó la distribución de los dominios de DM64, reconociendo este programa las siguientes regiones (figura 2), a partir de la secuencia aminoacídica de DM64 (gi 21309806: anexo 6.1) tomada del NCBI:

Por lo tanto de acuerdo a EMBL/SMART, DM64 tendría cuatro dominios tipo Ig y no cinco como lo sugieren Rocha *et al.* (2002). Para corroborar esto, se sometieron al programa EMBL/SMART la secuencia aminoacídica más completa de ?1BG encontrada y la única secuencia aminoacídica de DM43 (gi 24954693) disponible en NCBI [datos mostrados en Material Suplementario (<http://sites.google.com/site/juanferduque/dm64-3d-in-silico-suplemento>)], evidenciándose el mismo fenómeno: SMART no reconoce el segundo dominio Ig de estas proteínas, al contrario de que lo es reportado en la literatura (Neves-Ferreira *et al.*, 2002; Rocha *et al.*, 2002), por lo cual se considera esto como algo consistente que permite seguir tomando a DM64 como una proteína de cinco dominios tipo Ig.

**Modelos preliminares:** Después de varias pruebas, obtuvieron cinco modelos preliminares correspondientes las siguientes regiones (figura 2, tabla 1 y 2): 1-2, 2-5, 3-7, 6-8 y 8-10. La secuencia de cada modelo y su posición en la secuencia total es mostrada la tabla 2, la cual fue hecha fusionando los datos emanados de SMART (figura 2 y tabla 1), secuencia aminoacídica de DM64 y porciones



**Figura 2.** Distribución de los Dominios de DM64 Según EMBL/SMART. La secuencia aminoacídica de DM64 (gi: 21309806; Anexo 6.1) tomada del NCBI se sometió al programa SMART el cual, comparando con la estructura conocida para proteínas contenidas en la base de datos del EMBL, detectó estos dominios en DM64. Los óvalos representan dominios IG o tipo IG pero no pretenden representar ningún tipo de estructura 3D. La escala numérica representa cantidad y posiciones aminoacídicas. Estas posiciones son especificadas en la tabla 1.

modeladas por SM. No se tuvo en cuenta la región 1 emada por SMART porque la misma corresponde al péptido señal el cual se cliva durante la maduración de la proteína (Cooper, 2000), por lo cual DM64 se modeló sin estos aminoácidos. Este hecho se ve reflejado en la reenumeración aminoacídica llevada a cabo en la tabla 1.

En la tabla 3 se encuentra la lista y bibliografía de los modelos experimentales utilizados como plantillas por SM para modelar a DM64. Las plantillas experimentales usadas por SM son todas las estructuras experimentales disponibles en Protein Data Bank, que tenían al menos un 25% de homología (Schwede *et al.*, 2003) con DM64. Estas plantillas experimentales corresponden a receptores del sistema inmune, como podría esperarse de la filogenia

**Tabla 1.** Posiciones en la Secuencia Aminoacídica de DM64 (gi 21309806) según EMBL/SMART. La información emanada por SMART en las primeras dos columnas, y la reenumeración hecha después de descartar el péptido se señala en las últimas dos columnas.

| Posiciones aminoacídicas según SMART | Tipo de región/dominio según SMART             | Regiones utilizadas en este trabajo | Posiciones aminoacídicas sin péptido señal |
|--------------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| 1 a 23                               | Péptido Señal (PS)                             |                                     |  |
| 24 a 38                              | Región Desconocida (RD)                        | 1                                   | 1 a 15                                     |
| 39 a 118                             | Dominio tipo Inmunoglobulina (Dominio Tipo Ig) | 2                                   | 16 a 95                                    |
| 119 a 189                            | RD   | 3                                   | 96 a 166                                   |
| 190 a 202                            | Región de complejidad baja                     | 4                                   | 167 a 179                                  |
| 203 a 220                            | RD   | 5                                   | 180 a 197                                  |
| 221 a 307                            | Dominio Ig                                     | 6                                   | 198 a 284                                  |
| 308 a 319                            | RD   | 7                                   | 285 a 296                                  |
| 320 a 405                            | Dominio Ig                                     | 8                                   | 297 a 382                                  |
| 406 a 414                            | RD   | 9                                   | 383 a 391                                  |
| 415 a 502                            | Dominio Ig                                     | 10                                  | 392 a 481                                  |

**Tabla 2.** Regiones Correspondientes a los Cinco Modelos Preliminares Emanados de SM.D: Dominio; Ig: Inmunoglobulina; RCB: Región de Complejidad Baja; RD: Región Desconocida. Los aminoácidos subrayados corresponden a las regiones modeladas por SM y en negrita las regiones de sobreposición entre los cinco modelos (Regiones: 1-2, 2-5, 3-7, 6-8 y 8-10).

| Región | Inicio  | Aminoácidos  | Final |
|--------|---------|--|-------|
| 1      | RD      | 1 LLAMETTPRL WIETE   | 15    |
| 2      | D1 (Ig) | 16 SPSTPWTNVT LQCVATNTEA LSFQLWKDGE LLSTLPPMGL VGKFSLGPVT DDNRGLYRCR ILMFENTWTS PSEPVEVTGK               | 95    |
| 3      | D2 (RD) | 96 EPLPAPLLRA DPGPWILHGL ETKLHCQGV LGMIFDLYQE GEQEPVRSRSH TPGTEATFIV NNTGNYSCLY R                        | 166   |
| 4      | RCB     | 167 APAPASSVNS APS   | 179   |
| 5      | RD      | 180 ETIHVVIPDL LPKPDFHI  | 197   |
| 6      | D3 (Ig) | 198 <u>YDNQVIRPGD SVTFGCWGRF SGLFKLFDK GQEVFVKQS SKDPKHIFYE LTALGPEDGG KYSCRYFRN GPPIWSEDSK QLELVLT</u>  | 284   |
| 7      | RD      | 285 <u>TETLAKPSLS VE</u>   | 296   |
| 8      | D4 (Ig) | 297 <u>POETVISRGT KVTMRCQGAQ PNKVFLLKK GSPGHTLVLS SPESHVDFVL PNILSYDTGN FSCLYVQTEA PFAGSORSED VEIRVE</u> | 382   |
| 9      | RD      | 383 <u>GLLPKPTLH</u>   | 391   |
| 10     | D5 (Ig) | 392 PVHPVVAQGR DAILHCSGKI PNAHFQLFKD GEHEELEVSV LPIDDHAVNF LLKNINRQQG GKYRCRYTTR EDPILESEMS DPAPLQVTQQ   | 481   |

**Tabla 3.** Modelos Experimentales Usados por SM como Plantillas para Modelar las Cinco regiones de DM64. Los siguientes datos fueron obtenidos del NCBI a partir los códigos de las plantillas visibles en la ventana de alineamiento de DV. Con estos códigos, y buscando en la base de datos de proteínas del NCBI, se pueden obtener datos adicionales de cada estructura, como su bibliografía, secuencia, etc. En la primera columna de esta tabla se incluyen las regiones de DM64 modeladas (tabla 2) para clarificar que plantillas fueron utilizadas por SM-DV en cada uno de los cinco modelos. Se calcularon básicamente dos clases de homología (HL): estricta y promedio. El % de HL estricto de cada región con cada plantilla está entre paréntesis debajo del código de cada plantilla. A estos % de HL estricta de cada plantilla se sacó un promedio para cada región. Este resultado está indicado por  $\bar{x}$  en la primera columna. En la misma columna está indicado por  $X_i$  el porcentaje de HL estricta de cada región con todas sus plantillas a la vez. Al final de la tabla se muestran los totales de homología estricta (promedio de  $X_i$ s) y promedio (promedio de  $\bar{x}$ s). Los porcentajes de HL de cada región con sus plantillas fueron hallados analizando los alineamientos emanados por DV en el programa MEGA [Molecular Evolutionary Genetic Analysis versión 3.1 (Kumar *et al.*, 2004): <http://www.megasoftware.net/>].

| Región de DM64 (% HL)                              | Código (% HL)     | Definición   |
|--|-------------------|--|
| R1-2<br>( $X_i=32.73\%$ )<br>( $\bar{X}=32.73\%$ ) | 1o11A<br>(32.73%) | Cadena A, Región Extracelular del Receptor Humano NKp46.   |
|  | 1p6fA<br>(32.73%) | Cadena A, Estructura del Receptor de Citotoxicidad Natural Humano NKp46.   |
| R2-5<br>( $X_i=27.1\%$ )<br>( $\bar{X}=28.22\%$ )  | 1efxD<br>(27.1%)  | Cadena D, Estructura de un Complejo entre Receptor de Células Asesinas Humano KIR2DL2 y Ligando MHC Clase 1 HLA-Cw3.                     |
|  | 1efxE<br>(28.97%) | Cadena E, Estructura de un Complejo entre Receptor de Células Asesinas Humano KIR2DL2 y Ligando MHC Clase 1 HLA-Cw3.                     |
|  | 2dliA<br>(27.1%)  | Cadena A, Receptor de Células Asesinas para Inmunoglobulinas 2DL2, Forma Trigonal.   |
|  | 2dl2A<br>(28.97%) | Cadena A, Receptor de Células Asesinas para Inmunoglobulinas 2DL2.   |
|  | 1b6u<br>(28.97%)  | Estructura Cristalográfica del Receptor Inhibitorio de Células Asesinas Humanas KIR2DL3 Específico para Alelos Relacionados con HLA-Cw3. |

**Continuación Tabla 3. Modelos Experimentales Usados por SM como Plantillas para Modelar las Cinco regiones de DM64.**

| Región de DM64 (% HL)  | Código (% HL)     | Definición   |
|--|-------------------|--|
| R3-7<br>( $X_i = 15.87\%$ )<br>( $\bar{X} = 22.86\%$ )                     | 1uctA<br>(22.75%) | Cadena A, Estructura Cristalográfica del Fragmento Extracelular del Receptor I Fc Alpha (Cd89).  |
|  | 1ow0C<br>(22.22%) | Cadena C, Estructura Cristalográfica del FcaRI Humano Ligado a IgA1-Fc.  |
|  | 1ow0D<br>(22.75%) | Cadena D, Estructura Cristalográfica del FcaRI Humano Ligado a IgA1-Fc.  |
|  | 1ovzA<br>(22.22%) | Cadena A, Estructura Cristalográfica del FcaRI Humano  |
|  | 1ugnA<br>(24.34%) | Cadena A, Estructura Cristalográfica de Lir1.02, uno de los Alelos de Lir1.  |
| R6-8<br>( $X_i = 14.2\%$ )<br>( $\bar{X} = 25.44\%$ )                      | 1ollA<br>(28.4%)  | Cadena A, Región Extracelular del Receptor Humano NKp46.   |
|  | 1p6fA<br>(28.4%)  | Cadena A, Estructura del Receptor de Citotoxicidad Natural Humano NKp46.   |
|  | 2gw5A<br>(24.85%) | Cadena A, Estructura Cristalográfica de Lir-2 (Ilt2) en 1.8: Diferencias de Lir-1 (Ilt2) en Regiones Implicadas en el Enlace del Homólogo MHC U18 del Citomegalovirus Clase I. |
|  | 2d3vA<br>(22.49%) | Cadena A, Estructura Cristalográfica del Receptor A5 tipo Ig de Leucocitos (Lilra5LIR9ILT11).  |
|  | 1p7qD<br>(23.08%) | Cadena D, Estructura Cristalográfica de Hla-A2 Ligado a Lir-1, Un Hospedero y un Receptor MHC Viral  |
| R8-10<br>( $X_i = 10.87\%$ )<br>( $\bar{X} = 25.87\%$ )                    | 1g0xA<br>(29.89%) | Cadena A, Estructura Cristalográfica del Dominio de Enlace de Lir-1 (ILT2).  |
|  | 2d3vA<br>(22.28%) | Cadena A, Estructura Cristalográfica del Receptor A5 tipo Ig de Leucocitos (Lilra5LIR9ILT11).  |
|  | 1ugnA<br>(27.72%) | Cadena A, Estructura Cristalográfica de Lir1.02, uno de los Alelos de Lir1.  |
|  | 1p7qD<br>(27.17%) | Cadena D, Estructura Cristalográfica de Hla-A2 Ligado a Lir-1, Un Hospedero y un Receptor MHC Viral  |
|  | 1b6u<br>(22.28%)  | Estructura Cristalográfica del Receptor Inhibitorio de Células Asesinas Humanas KIR2DL3 Específico para Alelos Relacionados con HLA-Cw3.                                       |
| <b>20.15% Homología Total Estricta (Promedio de <math>X_i</math>s)</b>     |                   |  |
| <b>27.02% Homología Total Promedio (Promedio de <math>\bar{X}</math>s)</b> |                   |  |

de la FSIG, esquematizada por Hood *et al.* (1985) en la cual se ve que las 7 IBGs (que incluyen las proteínas tipo DM) pertenecen al linaje del receptor Poli-Ig. Si SM no utilizó más plantillas, es que porque no habían más estructuras experimentales que cumplieran los requisitos nombrados.

**Resometimiento de cada modelo a SM desde DV en modalidad de optimización:** Cada modelo y sus plantillas fueron sometidos a SM desde DV para ser optimizado. Después de varias pruebas, quedo claro que resometer, en modalidad optimizada, cada modelo más de una vez a SM no mejora el mismo, sino que esto incluso introduce gaps inútiles que podrían rebajar la calidad del modelo; por lo cual los siguientes son los resultados de una optimización para cada modelo, reportados en la tabla 4.

**Pulimiento en DV de cada modelo:** Cada modelo fue mejorado por medio del arreglo de la disposición de cadenas laterales problemáticas y de minimización de energía. El arreglo de cadenas laterales aumenta el número de cho-

ques, pero si se compara el número total de cadenas laterales problemáticas (choques + CLs sin enlaces de H apropiados) iniciales y finales (Tabla 5), se podrá ver que este número total disminuye después de los FQDs. Y disminuirá aún más con las minimizaciones de energía. Los resultados del arreglo de cadenas laterales y de la minimización de energía se reportan en las tablas 5 y 6, respectivamente.

**Ensamblaje de los modelos:** De acuerdo al orden de apareamiento explicado en métodos, se logró el siguiente modelo preliminar (figura 3), cuyos parámetros quedan expuestos en la tabla 7.

**Pulimiento de toda la subunidad (cinco dominios) de DM64:** Haciendo los mismos arreglos hechos para cada modelo se obtuvieron los siguientes resultados al utilizar los comandos Tools: Fix Selected Side Chains: Quick and Dirty y Tools: Energy Minimización (EM) en el modelo completo.

**Tabla 4.** Resultados de Una Optimización de Cada Modelo en SM. Cadena lateral (CL), Coincidencias se refiere a aminoácidos idénticos con plantilla(s): \* modelo con una plantilla; \*\* modelo con cinco plantillas.

| Item                                 | R1-2                          | R2-5 | R3-7 | R6-8 | R8-10 |
|--------------------------------------|-------------------------------|------|------|------|-------|
| Aminoácidos con choques              | 22                            | 0    | 0    | 0    | 0     |
| Aminoácidos con choques esqueléticos | 7                             | 0    | 0    | 0    | 0     |
| CLs sin Enlaces H Apropriados        | 47                            | 46   | 61   | 65   | 58    |
| Coincidencias                        | 36*                           | 29** | 30** | 24** | 20**  |
| <b>Pulimiento: →</b>                 | <b>Una Optimización en SM</b> |      |      |      |       |
| Aminoácidos con choques              | 0                             | 0    | 0    | 0    | 0     |
| Aminoácidos con choques esqueléticos | 0                             | 0    | 0    | 0    | 1     |
| CLs sin Enlaces H Apropriados        | 31                            | 34   | 54   | 55   | 56    |
| Coincidencias                        | 36*                           | 29** | 30** | 24** | 20**  |

**Tabla 5.** Resultados del Arreglo de las Cadenas Laterales (CLs). CLs arregladas con el protocolo Fix Quick and Dirty (FQD). Aminoácidos (aa), Esqueleto proteico (BB: Backbone), Enlace de Hidrógeno Apropriado (EHA). Energía medida como el campo de fuerza en Kilojoules/mol.

| Item                 | R1-2          | R2-5       | R3-7        | R6-8        | R8-10      |
|----------------------|---------------|------------|-------------|-------------|------------|
| aa con choques       | 0             | 0          | 0           | 0           | 0          |
| aa con choques BBs   | 0             | 0          | 0           | 0           | 1          |
| CLs sin EHAs         | 31            | 34         | 54          | 55          | 56         |
| Energía              | 679.497       | -1,366.442 | -412.846    | 4,716.173   | 2,303.241  |
| <b>Pulimiento: →</b> | <b>3 FQDs</b> |            |             |             |            |
| aa con choques       | 4             | 2          | 11          | 4           | 8          |
| aa con choques BBs   | 1             | 1          | 3           | 5           | 4          |
| CLs sin EHAs         | 21            | 22         | 35          | 35          | 30         |
| Energía              | 977,081.813   | 14,733.434 | 108,348.258 | 127'203,744 | 94,335.961 |

**Tabla 6.** Resultados de la Minimización de Energía. Aminoácidos (aa), Esqueleto proteico (BB: Backbone), Cadena lateral (CL), Enlace de Hidrógeno Apropriado (EHA). Minimización de Energía hecha con rondas de Steepest Descent (SD) y medida como el campo de fuerza en Kilojoules/mol.

| Item                  | R1-2          | R2-5          | R3-7          | R6-8          | R8-10         |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| aa con choques        | 4             | 2             | 11            | 4             | 8             |
| aa con choques BBs    | 1             | 1             | 3             | 5             | 4             |
| CLs sin EHAs          | 21            | 22            | 35            | 35            | 30            |
| Energía               | 977,081.813   | 14,733.434    | 108,348.258   | 127'203,744   | 94,335.961    |
| <b>Pulimientos: →</b> | <b>41 SDs</b> | <b>14 SDs</b> | <b>45 SDs</b> | <b>44 SDs</b> | <b>41 SDs</b> |
| aa con choques        | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             |
| aa con choques BBs    | 0             | 1             | 0             | 0             | 0             |
| CLs sin EHAs          | 20            | 49            | 31            | 38            | 35            |
| Energía               | -6.019        | -8.163        | 7.898         | -0.216        | 13.064        |

**Tabla 7.** Resultados del Arreglo de Cadenas Laterales (CLs) en toda la Subunidad de DM64 (cinco Dominios, R1-10). CLs arregladas con el protocolo Fix Quick and Dirty (FQD). Aminoácidos (aa), Esqueleto proteico (BB: Backbone), Enlace de Hidrógeno Apropriado (EHA).

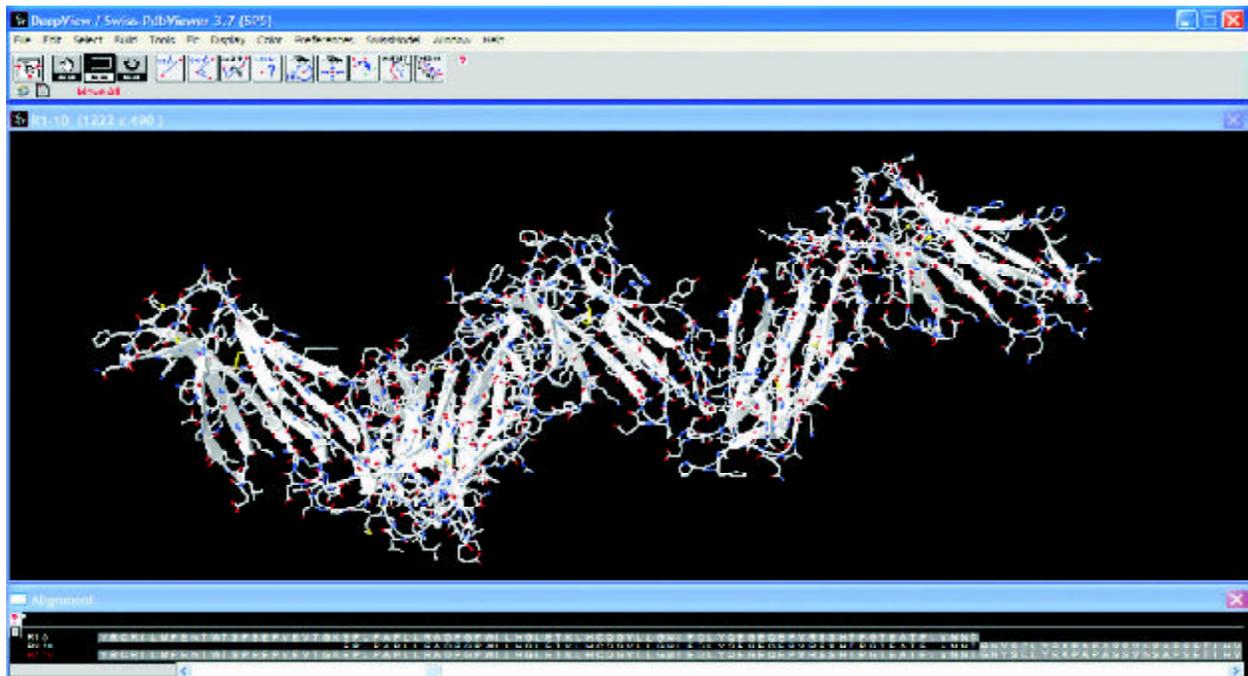
| Item                 | R1-10         |
|----------------------|---------------|
| aa con choques       | 53            |
| aa con choques BBs   | 23            |
| CLs sin EHAs         | 95            |
| <b>Pulimiento:</b> → | <b>2 FQDs</b> |
| aa con choques       | 32            |
| aa con choques BBs   | 15            |
| CLs sin EHAs         | 82            |
| <b>Pulimiento:</b> → | <b>52 SDs</b> |
| aa con choques       | 0             |
| aa con choques BBs   | 0             |
| CLs sin EHAs         | 82            |
| Energía              | -94.565       |

**Mediciones adicionales:** Se reportan en la tabla 8 las RMSDs del modelo DM64 con respecto a sus plantillas experimentales. Y en la tabla 9 se reportan los resultados de las mediciones angulares.

Otros métodos de evaluación de un modelo, disponibles desde DV incluyen: colorear el mismo de acuerdo a los Factores B (índice de aa más móviles o inestables), Energía de Enhebramiento (razonabilidad de la ubicación de un aa de acuerdo a su tipo y ambiente) y Accesibilidad. Estos métodos de evaluación gráfica se incluyen como Material Suplementario (<http://sites.google.com/site/juanferduque/dm64-3d-in-silico-suplemento>). Además Swiss Model incluye programas de evaluación como Anolea, Verify 3D y QMEAN. Este último programa, entre otros indicadores, emite un potencial de solvatación, por lo cual junto con la herramienta de colorear por accesibilidad, pueden ser útiles de cara a hacer simulaciones con modelos explícitos o implícitos de solvatación. No se utilizaron estos y otros programas de evaluación disponibles en Swiss Model porque éste es un modelo preliminar, y porque uno de los objetivos principales era compararlo globalmente con aquel logrado por *Neves-Ferreira et al.* (2002) para DM43, tarea que se logró como se verá a continuación en la Discusión. Por todo esto, la evaluación hecha del modelo de DM64 aquí presentado por medio de la RMSD y la Energía Potencial con el Campo de Fuerza GROMOS96, fue suficiente, por ahora. Teniendo en cuen-

**Tabla 8.** RMSDs entre los Carbonos Alfa (CAs) y Átomos del Esqueleto (BBs) de los Cinco Fragmentos Modelados de DM64 y sus Plantillas. Al final de esta tabla, en negrita, están los promedios de cada columna y el promedio total. Los códigos de cada plantilla y su bibliografía son explicados en la tabla 5.

| Región de DM64 (RMSD Promedio en Å)  | Plantilla Experimental (RMSD Promedio en Å) | Átomos Involucrados: RMSD en Å |
|--------------------------------------|---|--------------------------------|
| R1-2 (0.73)                          | 1ollA (0.72)                                | CAs: 0.7<br>BBs: 0.73          |
|                                      | 1p6fA (0.73)                                | CAs: 0.71<br>BBs: 0.74         |
| R2-5 (1.87)                          | 1efxD (1.67)                                | CAs: 1.66<br>BBs: 1.67         |
|                                      | 1efxE (1.81)                                | CAs: 1.81<br>BBs: 1.81         |
|                                      | 2dliA (1.8)                                 | CAs: 1.81<br>BBs: 1.79         |
|                                      | 2dl2A (2.19)                                | CAs: 2.2<br>BBs: 2.17          |
| R3-7 (2.23)                          | 1b6u (1.9)                                  | CAs: 1.92<br>BBs: 1.87         |
|                                      | 1uctA (1.35)                                | CAs: 1.35<br>BBs: 1.34         |
|                                      | 1ow0C (1.68)                                | CAs: 1.68<br>BBs: 1.67         |
|                                      | 1ow0D (2.48)                                | CAs: 2.47<br>BBs: 2.49         |
|                                      | 1ovzA (2.45)                                | CAs: 2.45<br>BBs: 2.45         |
| R6-8 (2.3)                           | 1ugnA (3.2)                                 | CAs: 3.21<br>BBs: 3.19         |
|                                      | 1ollA (1.81)                                | CAs: 1.82<br>BBs: 1.8          |
|                                      | 1p6fA (1.78)                                | CAs: 1.78<br>BBs: 1.77         |
|                                      | 2gw5A (2.72)                                | CAs: 2.73<br>BBs: 2.70         |
|                                      | 2d3vA (2.1)                                 | CAs: 2.12<br>BBs: 2.07         |
| R8-10 (2.38)                         | 1p7qD (3.08)                                | CAs: 3.1<br>BBs: 3.05          |
|                                      | 1g0xA (1.57)                                | CAs: 1.56<br>BBs: 1.58         |
|                                      | 2d3vA (2.73)                                | CAs: 2.76<br>BBs: 2.7          |
|                                      | 1ugnA (2.08)                                | CAs: 2.08<br>BBs: 2.07         |
|                                      | 1p7qD (2.86)                                | CAs: 2.86<br>BBs: 2.85         |
|                                      | 1b6u (2.65)                                 | CAs: 2.66<br>BBs: 2.63         |
| <b>Rango entre 0.72 y 3.2 Å RMSD</b> |   |                                |



**Figura 3. Ensamblaje de las Regiones 1-5 y 3-10.** Después de pre-ensamblar estas dos regiones con sus zonas de sobreposición (EPLP....VNNT), en la ventana inferior (Alignment), se utiliza el comando Edit: Create Merged Layer, para ensamblar las dos regiones, y lograr un modelo compuesto de izquierda a derecha por los Ds: 1, 2, 3, 4 y 5 de DM64. Modelo renderizado con cadenas laterales.

**Tabla 9.** Ángulos Articulares Interdominio del Modelo de DM64 reportados en grados (°)

|              |                |
|--------------|----------------|
| <b>D1-D2</b> | 103.42         |
| <b>D2-D3</b> | 108.26         |
| <b>D3-D4</b> | 119.12         |
| <b>D4-D5</b> | 91.97          |
| <b>Rango</b> | 91.97 a 119.12 |

ta todo esto y el hecho de que el último paso en el proceso de modelamiento, es la evaluación del modelo (Schwede *et al.*, 2003), se incluye el nombrado Material Suplementario.

### Discusión y conclusiones

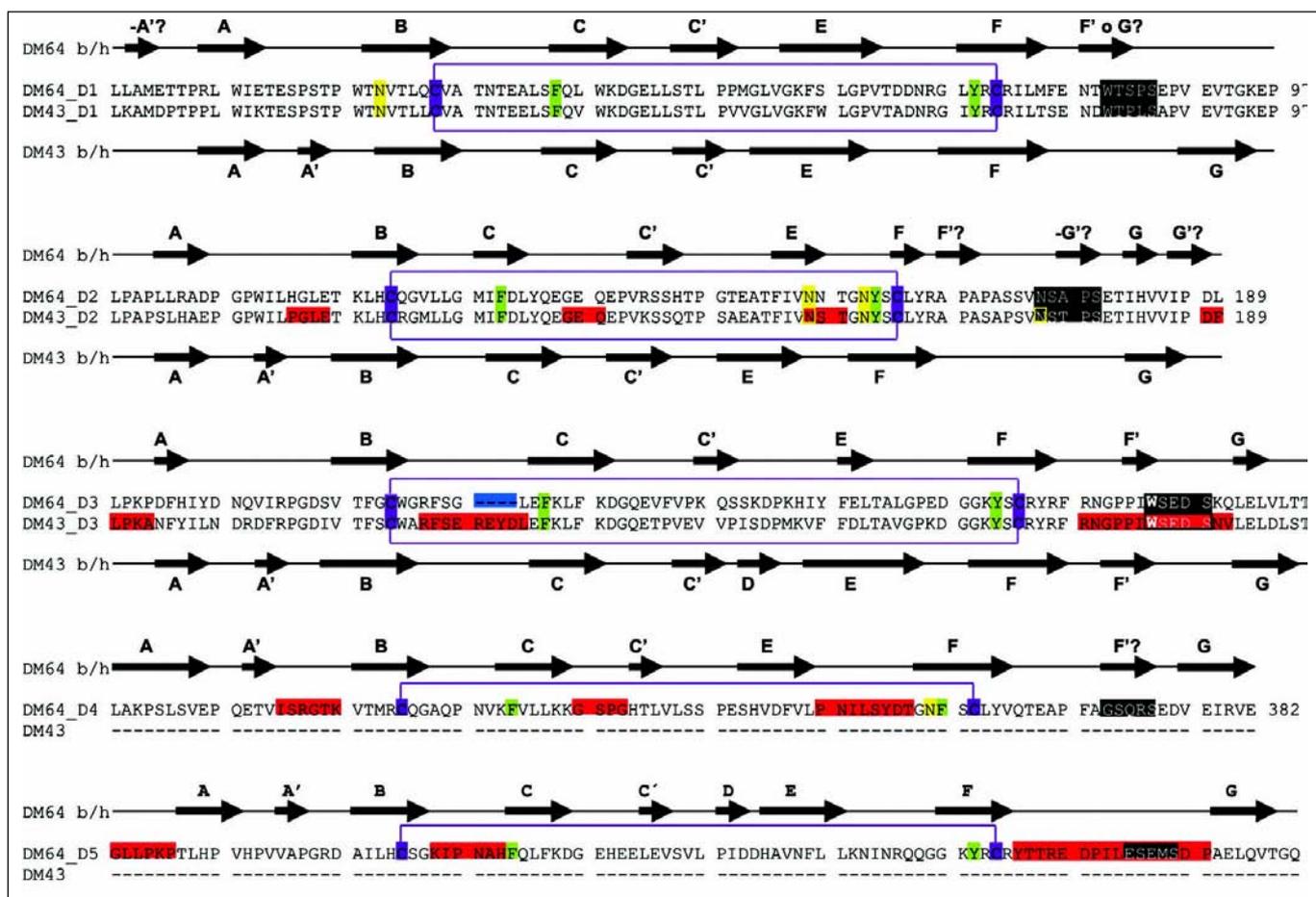
#### Homologías entre DM64 y plantillas de modelamiento:

El porcentaje total promedio de homología entre DM64 y las plantillas asignadas por SM fue de 27.02% HL promedio (promedio de  $\bar{X}_s$ ) y solo del 20.15% de HL estricta (promedio de  $X_s$ ). Todos estos porcentajes están por debajo de lo recomendado para hacer modelos por homología *in silico*, pues por ejemplo Guex *et al.* (1999) dicen que errores de alineamiento aparecen cuando el modelo y sus plan-

tillas tienen una homología menor del 40%. Entonces aunque homologías tan bajas no son recomendables para modelar una proteína por homología *in silico*, hay varios hechos que le dan validez al modelo reportado en esta investigación: con homologías comparables se modeló una proteína íntimamente relacionada con DM64, es decir el modelo de DM43 logrado por Neves-Ferreira *et al.* (2002). El otro hecho es haber logrado el modelo de DM64, pues si la homología hubiera sido tan baja como para no hacer un modelo, al menos aproximado, SM no hubiera devuelto los cinco fragmentos modelados, pues de acuerdo a Schwede *et al.* (2003) el proceso de modelamiento automático es llevado a cabo cuando al menos hay una homología del 25% entre el fragmento a modelar y al menos una de las plantillas experimentales. Otro resultado que le da credibilidad al modelo preliminar de DM64 presentado es su fuerza potencial (-94.565 KJ/mol), pues si bien no se encontraron referencias que indiquen que validez le da este valor al modelo logrado aquí, Kopp & Schwede (2004) dicen que en la base de datos de estructuras 3D de proteínas modeladas por homología, Swiss Model Repository, solo se incluyen modelos con un mínimo de 40% de homología con sus plantillas, 45 residuos o más y menos de 200 KJ/mol de fuerza potencial. Exceptuando el primer criterio, los otros

dos son cumplidos por el modelo de DM64 presentado aquí. Otro resultado que le da validez al modelo presentado es que a grandes rasgos la distribución de bucles y hebras  $\beta$  logrados para DM64 se corresponden a los presentados por DM43 por *Neves-Ferreira et al.* (2002). Con respecto a esto último se incluye la figura 4 para nutrir la discusión del modelo logrado aquí, y poder comparar la distribución de estructuras secundarias entre las dos proteínas. El sistema utilizado (SM-DV) y la baja homología de DM64 con las plantillas experimentales usadas explican las limitaciones del modelo logrado en este trabajo.

**Sitios putativos de N-glicosilación de DM64:** Según *Rocha et al.* (2002) el componente glicosilado de DM64 corresponde al 15% de su masa. De acuerdo a estos autores los posibles sitios de N-glicosilación de DM64 (cajas amarillas en figura 4) son: 23, 156, 160, 356. DM43 tiene un porcentaje de glicosilación de 21% y contiene la misma cantidad (cuatro) de sitios putativos de glicosilación que DM64. De todo esto se puede concluir que DM43 tiene un componente en carbohidratos más denso que DM64, lo cual deja abierta la posibilidad de relacionar este hecho con sus diferencias funcionales. Sin embargo también cabe



**Figura 4.** Alineamiento de DM43 y DM64. Este alineamiento fue exportado de MEGA/Clustal-W siguiendo los datos de estructura secundaria de *Rocha et al.* (2002) y *Neves-Ferreira et al.* (2002), para DM64 y DM43, respectivamente, y etiquetado en MS Word. En cajas amarillas los sitios de N-glicosilación, de los cuales hace parte el sitio N175 (marco amarillo) de DM43, el cual también conforma el comienzo a la segunda caja degenerada de triptófano de esta última proteína. Las cisteínas y los puentes disulfuro que forman están denotados en violeta. Los aminoácidos aromáticos conservados [Fenilalanina (F) y Tirosina (Y)], típicos del pliegue Ig, están demarcados por cajas verdes. Se señalan las cajas degeneradas de triptófano en cuadros negros. Un gap en DM64, que según *Rocha et al.* (2002) estaría explicando parte de las diferencias funcionales entre DM64 y DM43, está demarcado en una caja azul. Las flechas indican las hebras  $\beta$  (letras A a la G), asignadas para DM64 por SM-DV. Entre estas flechas se encuentran los bucles, denotados por líneas más delgadas. Esta distribución de bucles/hebras (b/h) quedó plasmada para DM64 en la figura 7. Las hebras de DM64 para las cuales no se pudo establecer una correspondencia inequívoca con las DM43 están acompañadas de ?. El menos (-) se refiere a una hebra prima (') que está antes de la hebra correspondiente principal (sin ').

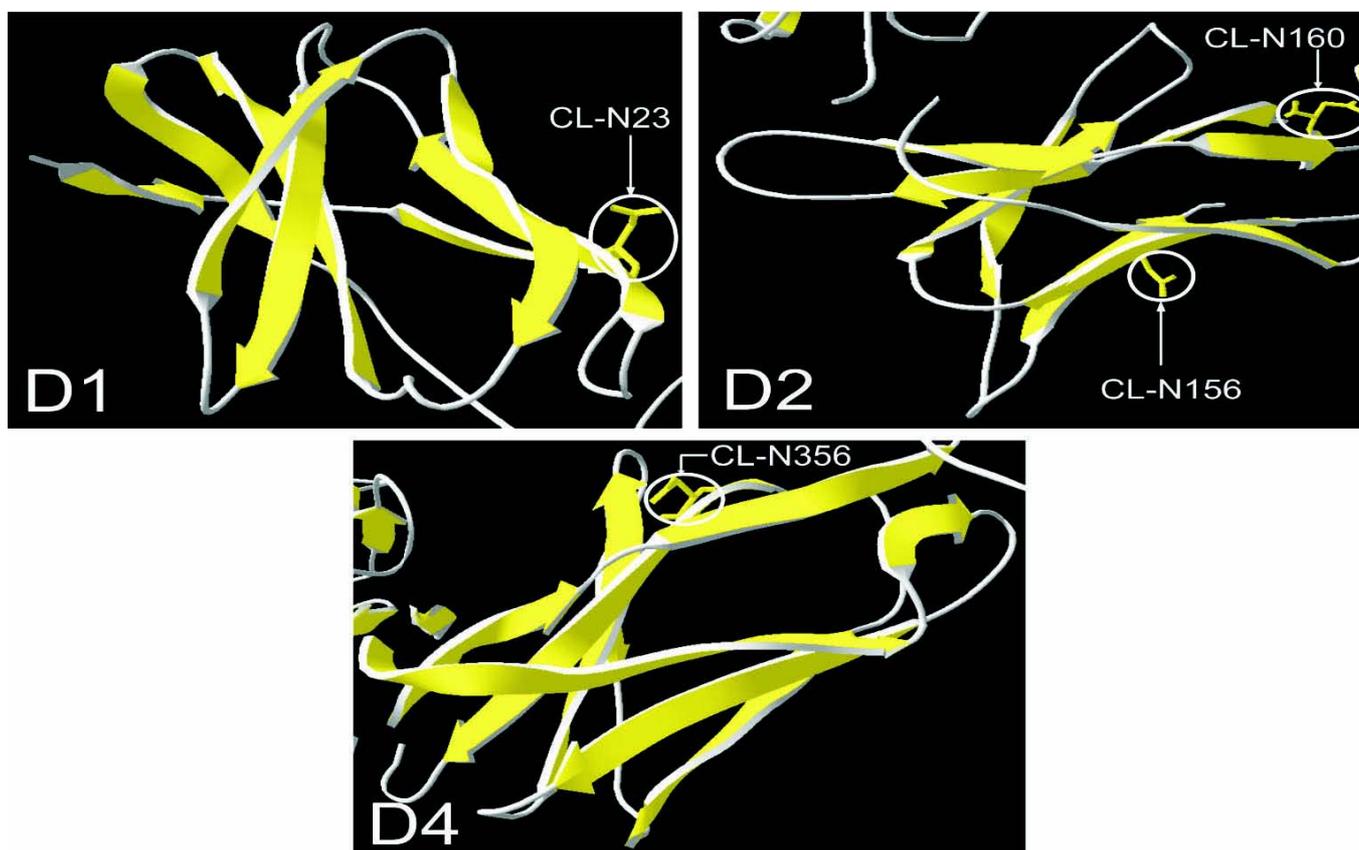
preguntar porque el sitio 175 de DM64 (principio de la caja degenerada de triptófano del segundo dominio) no lo incluyen **Rocha *et al.*** (2002) como uno de glicosilación putativa, dado que alinea con una asparagina correspondiente en DM43 (N175), que fue incluida por **Neves-Ferreira *et al.*** (2002) como posible sitio de glicosilación de esta última proteína.

En la figura 5 se ve como se ubican los sitios de N-glicosilación que tiene DM64 en el modelo logrado aquí. Como se puede ver en esta figura, las cadenas laterales de las Asparaginas que constituyen estos sitios, están orientadas hacia la parte exterior de cada dominio, como era esperado. Por lo tanto, este es otro hecho que le ayuda a dar validez al modelo presentado en este trabajo. Los Dominios (D) 3 y 5 de DM64 no tienen sitios de glicosilación según los mismos autores y por ende no fueron incluidos en esta figura.

**Puentes disulfuro y aminoácidos aromáticos conservados, típicos del pliegue Ig:** Al igual que DM43, DM64

tiene dos residuos de Cisteína (cajas violeta en figura 13) entre los hebras B y F de cada dominio, que estarían formando el clásico puente disulfuro inter-lámina del pliegue de las inmunoglobulinas, y que les estarían brindando a las proteínas de la FSIG estabilidad estructural (**Neves-Ferreira *et al.***, 2002). Para el caso de DM64 estos puentes se extienden entre (violeta en figura 4) las cisteínas 28-74 en el primer Dominio (D), 121-163 en el segundo D, 213-261 en el tercer D, 312-359 en el cuarto D, y 407-456 en el quinto D, siguiendo a **Rocha *et al.*** (2002). Además de esto, y al igual que en DM43 y  $\alpha$ 1BG (**Neves-Ferreira *et al.***, 2002; **Rocha *et al.***, 2002), DM64 contiene los aminoácidos aromáticos [Fenilalanina (F) y Tirosina (Y)] en posiciones conservadas, lo cual es típico del pliegue Ig (residuos en verde en figura 4).

**Cajas de triptófano y articulación D2-D3:** Al igual que DM43 y  $\alpha$ 1BG (**Neves-Ferreira *et al.***, 2002), DM64 también presenta una caja degenerada de triptófano WSXWS en cada uno de sus cinco dominios (**Rocha *et al.***, 2002). Este motivo secuencial se encuentra entre las hebras F y G de los

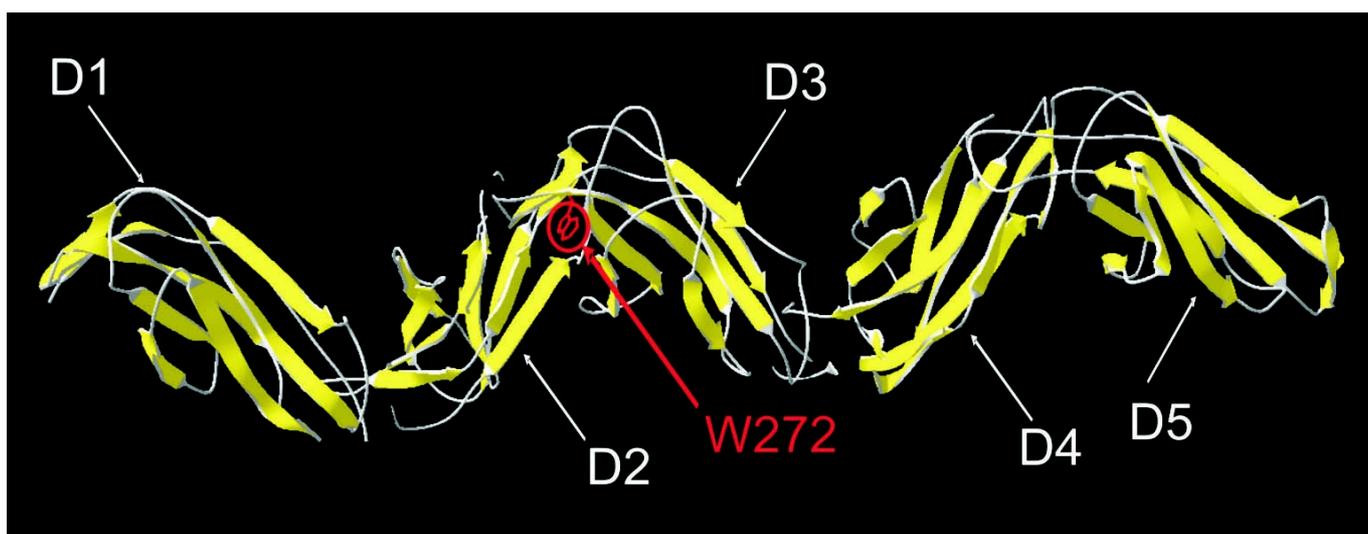


**Figura 5.** Ubicación de los sitios de N-glicosilación de DM64. Se seleccionaron en DV las cadenas laterales (CLs) de las Asparaginas (N) que según **Rocha *et al.*** (2002) constituirían los sitios de glicosilación de DM64.

tres dominios de DM43 y entre las hebras F y G de los dominios (D) 2, 3, 4 y 5 del modelo de DM64 presentado aquí. En cuanto al D1 de DM64, no se pudo identificar inequívocamente las hebras F y G, pero presuntivamente se puede decir que en este dominio, la caja degenerada de triptófono también se encuentra entre estas dos hebras. Las cajas degeneradas de triptófono de DM64 se caracterizan por tener serina (S) o treonina (T) en su segunda y quinta posición y son las siguientes (Rocha *et al.*, 2002; figura 4): WTSPS (posición 83 a 87 en el primer dominio), NSAPS (175 a 179 en el segundo dominio), WSEDS (272 a 276 en el tercer dominio), GSQRS (370 a 374 en el cuarto dominio), y ESEMS (467 a 471 en quinto dominio). De estas cinco cajas degeneradas de DM64, las tres primeras están relacionadas con las encontradas en los tres dominios de DM43. Según Neves-Ferreira *et al.* (2002) la caja de triptófono más auténtica es aquella ubicada al final del tercer dominio de DM43. El triptófono (W276) que incluye esta caja podría estar estabilizando la aguda articulación de 60° que resulto en este caso. Esta articulación aguda estabilizada por un W de una caja de triptófono degenerada es típica de las KIRs (Bottino *et al.*, 1995; Moretta *et al.*, 1996) y receptores hematopoyéticos [los cuales incluyen a los receptores de hormona de crecimiento y de prolactina (Bazan 1990; de Vos *et al.*, 1992; Somers *et al.*, 1994)], pero diferente a aquella vista en inmunoglobulinas, las cuales generalmente presentan un ángulo articular más abierto (Neves-Ferreira *et al.*, 2002). En el caso de DM64 este mismo triptófono corresponde al residuo W272 y, al igual que en DM43, está hacia el final del tercer dominio de DM64 pero tridimensionalmente también se acerca a la articulación del segundo y tercer dominio de DM64 (figura 6).

Al igual que para DM43 no se encontraron otros triptófonos relevantes que estuvieran estabilizando otras articulaciones interdominio en DM64. Una diferencia que hay resaltar entre los modelos de DM43 y DM64, es que para esta última se hallaron ángulos interdominio de 108.26° (tabla 9), los cuales son más abiertos que los 60° reportados por Neves-Ferreira *et al.* (2002) para la articulación del segundo y tercer dominio de DM43. Esta discrepancia se podría explicar por diferencias entre la metodología de medición de ángulos, la cual no es explicada por Neves-Ferreira *et al.* (2002). Otra posibilidad es que DM64 realmente tenga ángulos interdominio más abiertos, como es típico de las inmunoglobulinas y que este triptófono interdominio sea un motivo común con ciertas proteínas como las KIRs (Bottino *et al.*, 1995; Moretta *et al.*, 1996) y receptores hematopoyéticos (Bazan 1990; de Vos *et al.*, 1992; Somers *et al.*, 1994) pero que no necesariamente esté estabilizando un ángulo interdominio agudo.

**Análisis de la estructura terciaria del modelo de DM64:** Los miembros de la superfamilia de las inmunoglobulinas (FSIG), como es caso de  $\alpha$ 1BG, DM43 y DM64, están compuestos por dominios de origen evolutivo común (Hood *et al.*, 1985) de aproximadamente 100 residuos. Cada dominio tiene de 7 a 10 hebras  $\beta$  (A a G) que forman dos láminas  $\beta$  antiparalelas empacadas cara a cara en cada dominio con una topología y conectividad típica (Halaby *et al.*, 1999; Harpaz & Chothia, 1994). Cada proteína miembro de la superfamilia puede variar en su función, localización, cantidad, longitud y tipo de enlaces entre las hebras  $\beta$  (Halaby & Mornon, 1998; Harpaz & Chothia, 1994).



**Figura 6. Triptófono W272 de DM64.** Este triptófono, como su contraparte en DM43 (W276, figura 16), estaría ayudando a estabilizar la articulación del Dominio 2 (D2) con D3, según Neves-Ferreira *et al.* (2002).

En el caso de DM43, Neves-Ferreira et al. (2002) reportan que los tres dominios de esta proteína tienen un pliegue de Inmunoglobulinas (Ig) tipo I, en el cual cada hebra A primordial está dividida en hebras A (primera lámina  $\beta$ ) y A' (segunda lámina  $\beta$ ). Este tipo de pliegue Ig-I fue propuesto por Harpaz & Chotia (1994) como un modelo intermedio entre dominios tipo Ig-V (variable) y Ig C1 (constante). Otra de las características de este tipo de pliegue es no tener hebra C'' y solo tener una hebra C' corta. Según los mismos autores (Harpaz & Chotia, 1994) al pliegue Ig-I también pertenecen moléculas de adhesión y receptores celulares, como lo son la mayoría de plantillas usadas para modelar DM43 (Neves-Ferreira et al., 2002) y DM64 (tabla 3). Teniendo en cuenta las esquematizaciones de Halaby & Mornon (1998) y la caracterización del pliegue Ig-I hecha por Harpaz & Chotia (1994), la distribución de las hebras en cada dominio de proteínas como DM43 (Neves-Ferreira et al., 2002) y DM64 (figura 13) sería la siguiente:

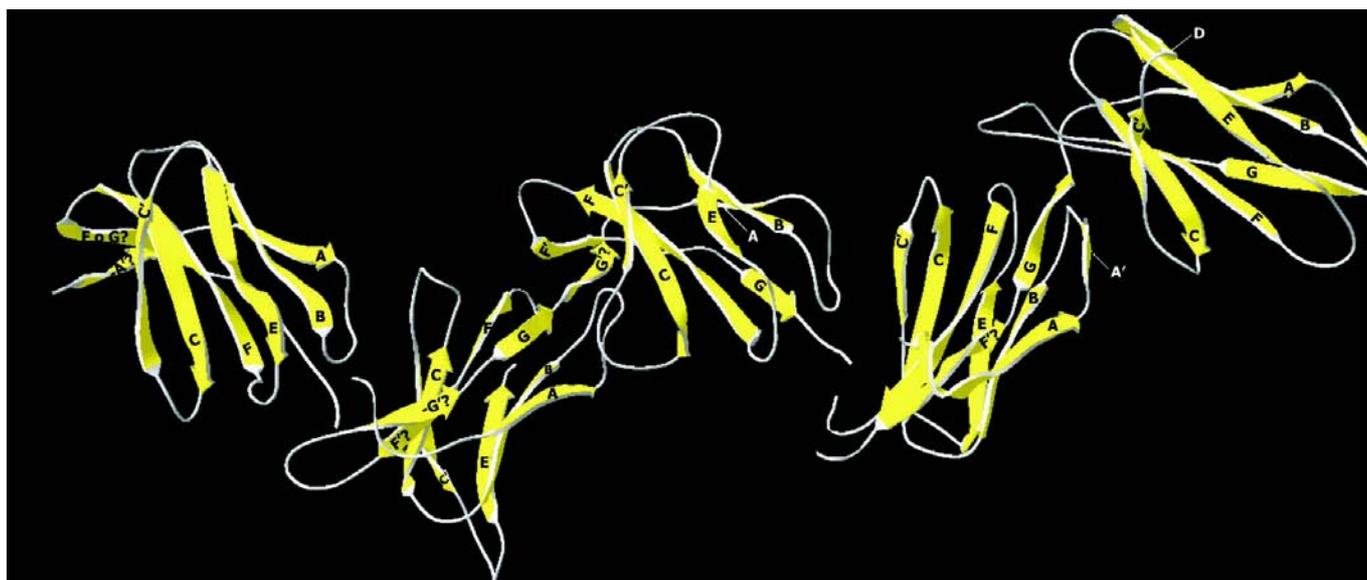
- 1ra lámina  $\beta$ : Hebras A, B, D y E
- 2da lámina  $\beta$ : A', C, C', F y G

En términos generales entonces DM43 y DM64 se ajustan al esquema anterior. Para el caso de DM43 la única excepción a este esquema es la presencia de una hebra F' en el tercer dominio (Neves-Ferreira et al., 2002). De una forma menos exacta, el modelo de DM64 también se ajusta

a la caracterización del pliegue Ig-I de Harpaz & Chotia (1994): sus dos últimos dominios tienen una hebra A dividida en hebra A como tal y hebra A' y posee también hebras C' de pocos aminoácidos, al igual que lo que sucede en DM43.

**Diferencias funcionales entre DM64 y DM43:** Una diferencia importante entre DM43 (Neves-Ferreira et al., 2002) y DM64 (Rocha et al., 2002), es que la segunda (al igual que  $\alpha$ 1BG) tiene un gap de cuatro amino-ácidos (a partir del residuo 220 de DM64) en un loop del tercer dominio que se cree contiene una de las regiones responsables para el enlace de hemorraginas por parte de DM43, por lo cual este gap podría explicar en parte la no actividad antihemorrágica de DM64. Con respecto a esto Neves-Ferreira et al. (2002) dicen que por analogía a los receptores de hormona de crecimiento (de Vos et al., 1992) y prolactina (Somers et al., 1994), bucles del segundo y tercer dominio de DM43 podrían estar formando la superficie de enlace para hemorraginas. Más exactamente serían los bucles que en DM43 conectan las hebras (residuos): A' con B (113-116), C con C' (136-138) y E con F (156-158) en el segundo dominio; el bucle interdominio (188-193); los bucles que conectan las hebras B con C (216-224), y F con G (270-282) en el tercer dominio (residuos rojos en figura 4).

Pero la diferencia más importante entre DM64 y DM43, es que la primera presenta dos dominios extra, carboxiterminalmente, lo cual podría sugerir, según Rocha et al. (2002),



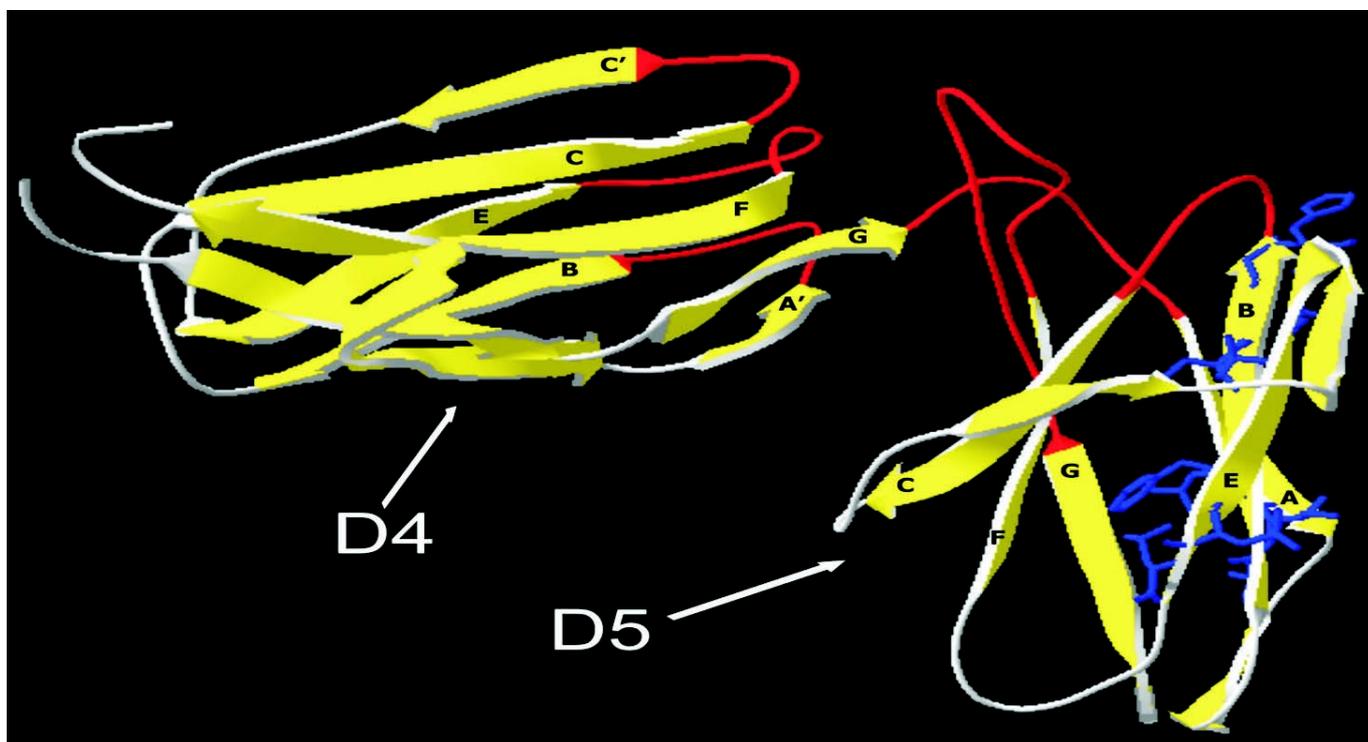
**Figura 7. Modelo de DM64 logrado aquí con el sistema SM-DV.** Renderizado sin cadenas en laterales, y etiquetado en Corel Draw 12. Aquellas hebras  $\beta$  demarcadas con ? serán discutidas como parte de las limitaciones de un modelo de baja resolución como este. De izquierda a derecha los dominios (D): D1, D2, D3, D4 y D5. Las etiquetas corresponden a las hebras esquematizadas en la figura 4.

que la región anti-miotóxica de DM64 está localizada en estos dos dominios. Teniendo en cuenta la homología que muestran entre sí los dominios de las proteínas de la FSIG (Hood *et al.*, 1985), las altas homólogías entre DM43 y DM64 y las similitudes observadas en este trabajo, se puede decir que los tres primeros dominios de DM43 son homólogos a los tres primeros dominios de DM64 y que los últimos dos dominios de las dos proteínas también son homólogos.

Se podría entonces hacer una especulación fundada en todo lo anterior, en el sentido de preguntarse cuales son los sitios de enlace con la miotoxina de DM64. No es muy aventurado entonces decir que los sitios de enlace con la toxina en DM64 son aquellos que unen las mismas hebras putativas de DM43, pero en los dominios cuatro y cinco de DM64. Es decir, los sitios de enlace con la miotoxina en DM64 podrían ser los bucles que unen las hebras (residuos): A' con B (302 a 307), C con C' (327 a 330), y E con F (347 a 354) en el cuarto dominio; el bucle interdominio (383 a 388); y los bucles que unen las hebras B con C (410 a 415), y F con G (458 a 473) en el quinto dominio (residuos rojos en Figura 4). Esta propuesta se esquematiza en la figura 8.

Siguiendo el mismo razonamiento presentado, se podría hacer también una propuesta sobre los sitios de homodimerización de DM64. Según Neves-Ferreira *et al.* (2002), en DM43 estos sitios serían un parche de aminoácidos hidrofóbicos principalmente de las hebras B y E. Por lo tanto, en DM64 los sitios de homodimerización corresponderían principalmente a residuos hidrofóbicos de las hebras B (A403, I404, L405, C407, G409) y E (H437, A438, V439, F441, L442, L443) del quinto dominio (cadenas laterales azules en figura 8).

**Cuestiones evolutivas entre DM64 y DM43:** Repetidamente se ha venido diciendo que las proteínas miembros de la FSIG surgen por duplicación de dominios homólogos de aproximadamente 100 amino ácidos (Alberts *et al.*, 2002; Hood *et al.*, 1985). De acuerdo a esto, cuando Rocha *et al.* (2002) comparan a DM64 con DM43, dejan implícito que la primera proteína descende de la última. Esto ciertamente es plausible, pero hay datos que muestran lo contrario. Por ejemplo la  $\alpha$ 1BG humana, proteína de cinco dominios, muestra alta homología con el receptor Poli-IgR (Ishioka *et al.*, 1986). ¿Estaría esto indicando que las proteínas tipo DM pertenecen al linaje Poli-IgR de la FSIG? Para relacio-



**Figura 8.** Putativos sitios de enlace con la miotoxina y sitios de homodimerización de DM64. De acuerdo a las homólogías mostradas entre DM64 y DM43, y siguiendo los datos reportados para esta última proteína por Neves-Ferreira *et al.* (2002), se proponen, para DM64, los sitios putativos de enlace con la miotoxina (bucles en rojo), y parte de la superficie de homodimerización (cadenas laterales en azul).

nar esta pregunta con lo que sigue, será que  $\alpha$ 1BG se puede tomar como una proteína generalizada dentro del grupo DM y hacer el papel de outgroup en una filogenia de este grupo? Además de estas cuestiones hay que tener en cuenta las similitudes halladas entre los D2 y D3 de DM43, y los D4 y D5 de DM64. ¿No estaría todo esto indicando que una proteína como DM43 desciende de una proteína de cinco dominios como DM64 o  $\alpha$ 1BG, vía la pérdida de los primeros dominios para llegar a ser una proteína de tres dominios? Esto ciertamente iría en contra de lo que dicen **Rocha et al.** (2002), pero también hay que tener en cuenta que es evolutivamente más parsimonioso, pues solo implicaría la pérdida de dominios aminoterminales y la mutación de ciertos amino ácidos, particularmente aquellos del sitio de enlace con la toxina. El otro escenario (el que tácitamente indican **Rocha et al.**, 2002), implicaría que se parte de una proteína de tres dominios, tipo DM43 y que está por duplicación de dominios, termina teniendo cinco. El problema de este escenario es que implicaría el traslado del sitio de enlace con la toxina de los bucles ubicados entre el segundo y tercer dominio, a aquellos ubicados entre el cuarto y quinto dominio, lo cual a todas luces es menos parsimonioso que el escenario propuesto en este trabajo. Para soportar parcialmente el escenario propuesto aquí, hay que recordar que aunque **Hood et al.** (1985) dicen que en la evolución de los miembros de una familia como la FSIG predominante se da duplicación de dominios, nos recuerda también que además se da: mutación, duplicación, delección e inserción de exones, genes o incluso familias génicas completas. Es más **Nei et al.** (1997) llaman a esto el modelo de nacimiento (duplicación) y muerte (delección) de genes en la evolución de familias multigen, dentro de lo cual enmarcan a la FSIG. Esto deja suficientes posibilidades para que también se dé supresión de dominios, como en el escenario evolutivo alternativo que se propone aquí.

**Limitaciones del modelo de DM64 presentado aquí:** Sin embargo, hay que tener presente que el sistema SM-DV produce modelos preliminares, y como tal, el modelo de DM64 generado en esta investigación tiene varias limitaciones, una de las cuales es la recuperación de hebras sospechosas (? en figura 4). Teniendo en cuenta la alta homología entre DM64 y DM43, es muy posible que las hebras  $\beta$  del modelo presentado aquí no equiparables con las correspondientes de DM43, demuestren limitantes de modelamiento propias de del sistema SM-DV. Estas hebras  $\beta$  de DM64 que se salen de la caracterización del pliegue Ig-I (**Harpaz & Chothia**, 1994; **Neves-Ferreira et al.**, 2002) son: en el primer dominio -A'?, F' o G'?; en el segundo dominio F'?, -G'?' y G'?'; y en el cuarto dominio F'?. Teniendo en cuenta esto, los dominios de DM64 cuyas hebras  $\beta$  mostraron mejor correspondencia con las de DM43, fue-

ron los tres últimos, pero particularmente el cuarto y el quinto, pues estos dos fueron los únicos dominios para los cuales se recuperó inequívocamente una hebra A' típica del pliegue Ig tipo I. Hay que aclarar que se compararon las hebras  $\beta$  de los primeros tres dominios de DM64 con los correspondientes de DM43, y los últimos dos dominios de DM64 fueron comparados respectivamente con el segundo y tercer dominio de DM43, teniendo en cuenta que las proteínas de la FSIG pueden evolucionar por duplicación de dominios homólogos (**Hood et al.**, 1985). La Compación del cuarto y quinto dominio de DM64 con el segundo y tercero de DM43, mejoró ostensiblemente la identificación de hebras que al principio parecían dudosas en el modelo de DM64. Es muy posible entonces que estas parejas de dominios sean homólogos (D4 de DM64 con D2 de DM43, y D5 de DM64 con D3 de DM43). Es curioso que los dominios aminoterminales de DM64 modelados aquí, son los que muestran mayores homologías con sus plantillas experimentales (tabla 3), pero también son aquellos para los cuales se recuperaron más hebras dudosas, sucediendo lo contrario para los dominios carboxiterminales.

Otra de las limitaciones del modelo de DM64 presentado en esta investigación es su baja resolución, tomado este concepto como la cantidad de datos utilizados para determinar una estructura (**Rhodes**, 2000) y medida aquí, entre otros indicadores, como la identidad secuencial entre el modelo problema (DM64) y sus plantillas (% homología), y como la desviación de las coordenadas de los átomos del modelo problema con respecto a sus plantillas experimentales (precisión medida en Å RMSD). Según **Guex & Peitsch** (2009) un modelo puede ser considerado impreciso si sus coordenadas atómicas no están dentro de 0.5 Å RMSD (Raíz de la Desviación Cuadrática Media) del control experimental, que en este caso son las plantillas explicadas en la tabla 3. De acuerdo a la tabla 8, el modelo de DM64 presentado aquí muestra un rango de desviación de 0.72 a 3.2 Å RMSD de las plantillas. Esta baja precisión se explica por la baja homología entre DM64 y sus plantillas (< 30%, tabla 3), pues según **Rhodes** (2000) aún modelos con homologías del 30-50% con sus plantillas, muestran RMSDs de hasta 1.5 Å.

Además del sistema usado (SM-DV), razones por las cuales el modelo obtenido es de baja resolución incluyen: que el programa de modelamiento no logró un modelo que alinease bien con las plantillas (o estas plantillas experimentales fueron logradas a partir de proteínas que estaban enlazadas a algún sustrato, mientras el modelo logrado aquí no) o que durante la minimización de energía, las coordenadas del modelo se desviaron de las coordenadas de las plantillas, lo cual irónicamente puede reducir la precisión del modelo, pero a la vez mejorarlo (**Rhodes**, 2000). Y esto

no sería exclusivo para el proceso de minimización de energía, pues durante el proceso de pulimiento de los modelos, se observó que por ejemplo el arreglo de cadenas laterales que presentaran choques con otros átomos de la proteína, aumentaba la energía potencial, es decir, iba en contra de lo logrado por el proceso de minimización de energía (por eso este se dejó de último). De todo esto se concluye que, solo tomando dos parámetros como son precisión y energía potencial (interacciones atómicas problemáticas), el arreglar cualquiera de los dos, empeora el otro. Al final todo esto apunta a que el modelo, por más que se pule, no puede sobrepasar las limitaciones del sistema utilizado (SM-DV), y el producto final (modelo por homología *in silico*) no puede ser mejor que las plantillas experimentales sobre el cual está basado (Guex & Peitsch 2009).

Sin embargo, estos modelos de “Baja Resolución”, los cuales tienen una homología menor del 70% con sus plantillas, pueden ayudar a: racionalizar experimentos de mutagénesis dirigida encaminados en la identificación de un residuo esencial para un determinado proceso de reconocimiento y enlace con algún sustrato, en la aproximación a la dilucidación de la función de una proteína o en la construcción de estructuras supramoleculares (Contreras-Moreira *et al.*, 2002; Guex & Peitsch, 1997). También se podría decir que un modelo de baja resolución como el presentado aquí es útil para objetivos de docencia, y para servir como modelo borrador que pueda ser mejorado en sistemas más elaborados.

**Recomendaciones y futuros desarrollos con respecto a DM64:** Se recomienda entonces que el modelo preliminar de DM64 logrado en este trabajo, sea mejorado con sistemas de mayor resolución como Insight II o Modeller 9 de Accelrys (<http://www.accelrys.com/products/>), o Modeller (Sali, 2009). Una vez mejorado el modelo, el paso a seguir podría ser probar los putativos sitios de enlace de DM64 con las miotoxinas, lo cual se puede hacer utilizando la técnica de Docking en softwares como Insight II.

La profundización de estudios como el presentado con respecto a DM64 puede ayudar a desarrollar terapias anti-ofídicas más efectivas y seguras que las actuales (Hains & Broady, 2000; Lizano *et al.*, 2003; Neves-Ferreira *et al.*, 1997, 2000; Pérez & Sánchez, 1999; Soares *et al.*, 2003; Thwin & Gopalakrishnakone, 1998; Weissenberg *et al.*, 1991) y a solucionar patologías en las cuales estén involucrados desbalances entre PLAs y PLIs como asma, choques sépticos, inflamación, artritis (Soares *et al.*, 2003; Thwin *et al.*, 2000). DM64 supone además un interés combinado (Duque-Osorio *et al.*, 2007: terapias anti-ofídicas y patologías mencionadas), pues esta proteína es capaz de

neutralizar los efectos miotóxicos de las II PLA<sub>2</sub>s (Lizano *et al.*, 2003) sin afectar su actividad enzimática (Rocha *et al.*, 2002), por lo cual sería posible usarla para tratar estos efectos de los venenos de vipéridos, sin afectar el funcionamiento de las PLA<sub>2</sub>s endógenas del paciente (Perales & Domont, 2002), lo cual también la hace prometedora para el desarrollo de medicamentos anti-inflamatorios. Por todo esto, el estudio de proteínas como DM64, además de ser científicamente interesante, también tienen un buen potencial de utilidad práctica médica (Duque-Osorio *et al.*, 2007).

Y como colofón final se confirma entonces la utilidad del sistema SM-DV como herramienta para la producción de modelos preliminares de proteínas por homología *in silico*, a un bajo costo en términos de infraestructura informática, pues SM-DV es una herramienta gratuita que funciona con computadores corrientes. Todo esto hace de este sistema una muy buena opción para ayudar al desarrollo de la bioinformática en nuestros países.

### Material suplementario

El presente artículo es un derivado del informe final del trabajo de grado de MSc del autor principal (Juan-Fernando Duque-Osorio: JFDO). La versión completa de este trabajo de grado se puede ver en la dirección del Material Suplementario (<http://sites.google.com/site/juanferduque/dm64-3d-in-silico-suplemento>). En este documento, y entre otros datos adicionales, el lector podrá ver los alineamientos de los modelos problemas con sus plantillas experimentales (tablas 6 a la 10 de la sección de Resultados) y en la sección de Anexos podrá ver las secuencias y demás datos relacionables con el NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) de las proteínas: DM64, DM43 y  $\alpha$ 1BG. Como se dejó entrever al final la sección de Mediciones Adicionales de los Resultados, el otro documento incluido dentro del Material Suplementario es el ejercicio de evaluación gráfica hecha sobre el modelo, usando algunas de las opciones que para tal fin ofrece Deep View. Este documento es introducido por la explicación a los principales criterios usados para la evaluación de un modelo como el presentado en este trabajo.

### Agradecimientos

El autor principal le agradece a su familia por el apoyo, y particularmente a su padre, el Dr. Álvaro Duque Donoso (quien murió un mes después de haberse obtenido el grado de MSc por parte de JFDO), y quien siempre le inculcó a sus hijos un grandísimo amor por el estudio. JFDO le agradece a sus amigos más cercanos por haber servido de apoyo y distracción durante los momentos más estresantes de esta MSc. Al

Dr. John Fredy Vallejo y a su personal médico de la clínica Imbanaco de Cali, quienes con su increíble esfuerzo salvaron la vida de JFDO en 2002 durante un insuceso colónico que interrumpió el curso de esta MSc por algunos años. A nuestros superiores y compañeros de la Escuela de Ciencias Básicas Médicas de Univalle, por el apoyo dado durante esta MSc. A los profesores Leonardo R. Lareo (Grupo de Bioinformática, Facultad de Ciencias, Universidad Javeriana-Bogotá), Pedro A. Moreno (Grupo de Bioinformática, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle) y Heiber Cárdenas (Grupo de Ecogenética y Biología Molecular, Facultad de Ciencias, Universidad del Valle) quienes fueron los jurados de este trabajo de grado, y quienes lo mejoraron ostensiblemente con sus correcciones. Al profesor Gale Rhodes de la Universidad de Southern Maine-USA por haber respondido preguntas claves sobre el modelamiento de proteínas *in silico* por homología. A N. Guex, M.C. Peitsch y T. Schwede por haber desarrollado una herramienta tan adecuada como Swiss Model-Deep View, para aquellos que no somos expertos en el modelamiento de proteínas. Y finalmente se le agradece al Evaluador anónimo contactado por la revista ACCEFYN, quien con sus correcciones y sugerencias ayudó a mejorar sensiblemente este artículo.

## Bibliografía

- Alberts B., Johnson A. Lewis J., Raff M., Roberts K. & P. Walter. 2002. *The Molecular Biology of the Cell*. Garland Science, New York, USA.
- Bazan J.F. 1990. Structural Design and Molecular Evolution of a Cytokine Receptor Superfamily. *PNAS* 87: 6934-6938.
- Biardi J.E., Coss R.G. & D.G. Smith. 2000. California Ground Squirrel (*Spermophilus beecheyi*) Blood Sera Inhibits Crotalid Venom Proteolytic Activity. *Toxicon* 38(5): 713-721.
- Bjarnason, J.B. & J.W. Fox. 1994. Hemorrhagic Metalloproteinases from Snake Venoms. *Pharmac. Ther.* 62(3): 325-372.
- Bottino C., Vitale M., Pende D., Biassoni R. & A. Moretta. 1995. Receptors for HLA Class I Molecules in Human NK Cells. *Seminars in Immunology* 7: pp 67-73.
- Catanese J.J. & L.F. Kress. 1992. Isolation from Opossum Serum of a Metalloproteinase Inhibitor Homologous to Human  $\alpha$ 1B-glycoprotein. *Biochemistry* 31: 410-418.
- Chippaux J.P. & Goyfon M. 1998. Venoms, Antivenoms and Immunotherapy. *Toxicon* 36(6):823-846.
- Contreras-Moreira B., Fitzjohn P.W. & P.A. Bates. 2002. Comparative Modelling: An Essential Methodology for Protein Structure Prediction in the Post-Genomic Era. *Applied Bioinformatics* 1(4): 177-190.
- Contreras-Moreira B. & P.A. Bates. 2002. Domain Fishing: A First Step in Protein Comparative Modelling. *Bioinformatics* 18(8): 1141-1142.
- Cooper G.M. 2000. *The Cell: A Molecular Approach*. Second Edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts, USA.
- de Vos A.M., Ullsch M. & A.A. Kossiakoff. 1992. Human Growth Hormone and Extracellular Domain of its Receptor: Crystal Structure of the Complex. *Science* 255: 306-312
- Domont G.B., Perales J. & H. Moussatche. 1991. Natural Anti-Snake Venom Proteins. *Toxicon* 29(10):1183-94.
- Duque-Osorio J.F., Sánchez A., Fierro L., Garzón S. & R.S. Castaño. 2007. Venenos de Serpientes y Moléculas Antiveneno. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Físicas Exactas y Naturales (ACCEFYN)* 31(118): 109-137.
- Gold B.S., Dart R.C. & R.A. Barish. 2002. Bites of Venomous Snakes. *N. Engl. J. Med.* 347: 347 - 356.
- Guex N. & M.C. Peitsch. 1997. *SWISS-MODEL* and the Swiss-PdbViewer: An environment for comparative protein modeling. *Electrophoresis* 18 (15): 2714-2723.
- Guex N. & M.C. Peitsch. 2009. Principles of Protein Structure, Comparative Protein Modelling and Visualisation. [publicación en línea]. Disponible desde Internet en: <<http://swissmodel.expasy.org/course/course-index.htm>> [con acceso el 06-May-2009].
- Guex N., Diemand A. and M.C. Peitsch. 1999. Protein Modelling for All. Elsevier *TIBS* 24: 364-367.
- Guex N., Diemand A., M.C. Peitsch & T. Schwede. 2008. The Swiss Institute of Bioinformatics Presents Deep View (Swiss PDB Viewer). [publicación en línea]. Disponible desde Internet en: <<http://swissmodel.expasy.org/spdbv/>> [con acceso el 06-May-2009].
- Gunsteren W.F., Billeter S.R., Eising A.A., Hünenberger P.H., Krüger P., Mark A.E., Scott A.M. & I.G. Tironi. 2009. Biomolecular Simulation: The Gromos Manual. [publicación en línea]. Disponible desde Internet en: <<http://www.igc.ethz.ch/GROMOS/manual>> [con acceso el 06-May-2009].
- Gutiérrez J.M. & A. Rucavado. 2000. Snake Venom Metalloproteinases: Their Role in the Pathogenesis of Local Tissue Damage. *Biochimie* 82(9-10): 841-50.
- Gutiérrez J.M. & C.L. Ownby. 2003. Skeletal Muscle Degeneration Induced by Venom Phospholipases A<sub>2</sub>: Insights Into the Mechanisms of Local and Systemic Myotoxicity. *Toxicon* 42(8): 915-931.
- Hains P.G. & K.W. Broady. 2000. Purification and Inhibitory Profile of Phospholipase A<sub>2</sub> Inhibitors from Australian Elapid Sera. *Biochem J* 346: 139-146.
- Hains P.G., Sung K.L., Tseng A. & K.W. Broady. 2000. Functional Characteristics of a Phospholipase A<sub>2</sub> Inhibitor from *Notechis ater* Serum. *J Biol Chem* 275: 983-991.
- Hains P.G., Nield B., Skuloski S., Dunn R. & K. Broady. 2001. Sequencing and Two-dimensional Structure Prediction of a Phospholipase A<sub>2</sub> Inhibitor from the Serum of the Common Tiger Snake (*Notechis scutatus*). *J Mol Biol* 312: 875-884.
- Halaby D.M. & J.P.E. Mornon. 1998. The Immunoglobulin Superfamily: An Insight on Its Tissue, Species, and Functional Diversity. *J Mol Evol* 46: 389-400.
- Halaby D.M., Poupon A. & J.P. Mornon. 1999. The Immunoglobulin Fold Family: Sequence Analysis and 3D Structure Comparisons. *Protein Engineering* 12(7): 563 - 571.

- Harpaz Y. & C. Chothia.** 1994. Many of the Immunoglobulin Superfamily Domains in Cell Adhesion Molecules and Surface Receptors Belong to a New Structural Set Which is Close to that Containing Variable Domains. *J Mol Biol* 238: 528-539.
- Hood L., Kronenberg M. & T. Hunkapiller.** 1985. T Cell Antigen Receptors and the Immunoglobulin Supergene Family. *Cell* 40: 225-229.
- Ishioka N., Takahashi N. & F.W. Putnam.** 1986. Amino Acid Sequence of Human Plasma  $\alpha$ -1B-glycoprotein: Homology to the Immunoglobulin Supergene Family. *PNAS* 83: 2363-2367.
- Jia L.G., Shimokawa K., Bjarnason J.B. & J.W. Fox.** 1996. Snake Venom Metalloproteinases: Structure, Function and Relationship to the ADAMs Family of Proteins. *Toxicon* 34(11-12): 1269-1276.
- Jurgilas P.B., Neves-Ferreira A.G.C., Domont G.B. & J. Perales.** 2003. PO41, a Snake Venom Metalloproteinase Inhibitor Isolated From Philander Opossum Serum. *Toxicon* 42: 621-628.
- Kamiguti A.S., Hay C.R., Theakston R.D. & M. Zuzel.** 1996. Insights into the Mechanism of Haemorrhage Caused by Snake Venom Metalloproteinases. *Toxicon* 34(6): 627-642.
- Kamiguti A.S., Zuzel M. & R.D. Theakston.** 1998. Snake Venom Metalloproteinases and Disintegrins: Interactions With Cells. *Braz J Med Biol Res* 31(7): 853-62.
- Kaplan W. & T.G. Littlejohn.** 2001. Swiss-PDB viewer (Deep View). Briefings in Bioinformatics 2(2): 195-197.
- Kopp J. & T. Schwede.** 2004. The SWISS-MODEL Repository of Annotated Three-Dimensional Protein Structure Homology Models. *Nucleic Acids Research* 32: D230-D234.
- Kumar S., Tamura K. & M. Nei.** 2004. MEGA 3: Integrated Software for Molecular Evolutionary Genetics Analysis and Sequence Alignment Briefings in Bioinformatics 5:150-163.
- Lehtinen M.J., Meri S. and T.S. Jokiranta.** 2004. Interdomain Contact Regions and Angles Between Adjacent Short Consensus Repeat Domains. *J. Mol. Biol.* 344(5): 1385-1396.
- Letunic I., Copley R.R., Schmidt S., Ciccarelli F.D., Doerks T., Schultz J., Ponting C.P. & P. Bork.** 2004. SMART 4.0: Towards Genomic Data Integration. *Nucleic Acids Research* 32: D142-D144.
- Lizano S., Domont G. & J. Perales.** 2003. Natural Phospholipase  $A_2$  Myotoxin Inhibitor Proteins from Snakes, Mammals and Plants. *Toxicon* 42: 963-977.
- Lomonte B., Ángulo Y. & L. Calderón.** 2003. An Overview of Lysine-Phospholipase  $A_2$  Myotoxins from Crotalid Snake Venoms and their Structural Determinants of Myotoxic Action. *Toxicon* 42(8): 885-901.
- Martínez R.R., Pérez J.C., Sánchez E.E. & R. Campos.** 1999. The Antihemorrhagic Factor of the Mexican Ground Squirrel, (*Spermophilus mexicanus*). *Toxicon* 37: 949-954.
- Matsui T., Fujimura Y. & K. Titani.** 2000. Snake Venom Proteases Affecting Hemostasis and Thrombosis. *Biochim Biophys Acta* 1477(1-2): 146-156.
- Mattison C.** 1995. The Encyclopedia of Snakes. Facts on Life, Inc. New York. 256 pp.
- Melo P.A. & G. Suarez-Kurtz.** 1988. Release of Sarcoplasmic Enzymes from Skeletal Muscle by *Bothrops jaracussu* venom: Antagonism by Heparin and by the Serum of South American Marsupials. *Toxicon* 26:87-95.
- Moretta A., Bottino C., Vitale M., Pende D., Biassoni R., Mingari M.C. & L. Moretta.** 1996. Receptors for HLA Class-I Molecules in Human Natural Killer Cells. *Annu Rev Immunol* 14:619-648.
- Nei M., Gu X. & T. Sitnikova.** 1997. Evolution by the Birth-and-Death Process in Multigene Families of the Vertebrate Immune System. *PNAS* 94: 7799-7806.
- Neves-Ferreira A.G.C., Perales J., Ovadia M., Moussatché H. & G.B. Domont.** 1997. Inhibitory Properties of the Antibiothropic Complex from the South American Opossum (*Didelphis marsupialis*) Serum. *Toxicon* 35(6): 849-863.
- Neves-Ferreira A.G.C., Cardinale N.; Rocha S.L.G., Perales J. & G.B. Domont.** 2000. Isolation and Characterization of DM40 and DM43, Two Snake Venom Metalloproteinase Inhibitors from *Didelphis marsupialis* Serum. *Biochim Biophys Acta* 1474: 309-320.
- Neves-Ferreira A.G.C., Perales J., Fox J.W., Shannon J.D., Makino D.L., Garratt R.C. & G.B. Domont.** 2002. Structural and Functional Analyses of DM43, a Snake Venom Metalloproteinase Inhibitor from *Didelphis marsupialis* Serum. *J Biol Chem* 277: 13129-13137.
- Núñez C.C., Ángulo Y. & B. Lomonte.** 2001. Identification of the Myotoxic site of the Lys49 Phospholipase  $A_2$  from *Agkistrodon piscivorus piscivorus* Snake Venom: Synthetic C-terminal Peptides from Lys49, but not from Asp49 Myotoxins, Exert Membrane-damaging Activities. *Toxicon* 39(10): 1587-1594.
- Ohno M., Chijiwa T., Oda-Ueda N., Ogawa T. & S. Hattori.** 2003. Molecular Evolution of Myotoxic Phospholipases  $A_2$  from Snake Venom. *Toxicon* 42(8): 841-854.
- Omori-Satoh T., Yamakawa Y. & D. Mebs.** 2000. The Antihemorrhagic Factor, Erinacin, from the European Hedgehog (*Erinaceus europaeus*), a Metalloprotease Inhibitor of Large Molecular Size Possessing Ficolin/Opsonin P35 Lectin Domains. *Toxicon* 38(11): 1561-1580.
- Ownby C.L., Colberg T.R. & H.S. Selistre-de-Araujo.** 1998. Phospholipase  $A_2$  Toxins: Diversity in Structure and Function. 12<sup>th</sup> World Congress on Animal, Plant and Microbial Toxins. *Toxicon* 36(9):1219-1232.
- Peitsch M.C.** 2002. About the Use of Protein Models. *Bioinformatics* 18 (7): 934-938.
- Perales J., Moussatche H., Oliveira B., Marangoni S. & G.B. Domont.** 1994. Isolation and Partial Characterization of an Antibiothropic Complex From Serum of South American Didelphidae. *Toxicon* 32: 1237-1249.
- Perales J. & G.B. Domont.** 2002. Are Inhibitors of Metalloproteinases, Phospholipases  $A_2$  and Myotoxins Members of the Innate Immune System?. Pp: 435-455 *En: Menéz A. (ed.). Perspectives in Molecular Toxinology.* John Wiley & Sons. 485 pp.
- Pérez J.C. & E.E. Sanchez.** 1999. Natural Protease Inhibitors to Hemorrhagins in Snake Venoms and Their Potential use in Medicine. *Toxicon* 37(5): 703-28.
- Pruess M. & R. Apweiler.** 2003. Bioinformatics Resources for *In Silico* Proteome Analysis. *Journal of Biomedicine and Biotechnology* 4 (2003): 231-236.

- Qi Z.Q., Yonaha K., Tomihara Y. & S. Toyama.** 1994. Characterization of the Antihemorrhagic Factors of Mongoose (*Herpestes edwardsii*). *Toxicon* 32(11): 1459-1469.
- Rhodes G.** 2000. Judging the Quality of Macromolecular Models: A Glossary of Terms from Crystallography, NMR, and Homology Modeling. [publicación en línea]. Disponible desde Internet en: <<http://spdbv.vital-it.ch/TheMolecularLevel/ModQual/>> [con acceso el 06-May-2009]
- Rhodes G.** 2008. Molecular Modeling for Beginners: Tutorial For Deep View (Swiss-PdbViewer). Disponible desde Internet en: <<http://spdbv.vital-it.ch/TheMolecularLevel/SPVTut/>> [con acceso el 06-May-2009]
- Rocha S.L.G., Lomonte B., Neves-Ferreira A.G.C., Trugilho M.R.O., Junqueira-de-Azevedo I.L.M., Ho P.L., Domont G.B., Gutiérrez J.M. & J. Perales.** 2002. Functional Analysis of DM64, an Antimyotoxic Protein with immunoglobulin-like Structure from *Didelphis marsupialis* serum. *Eur J Biochem* 269: 6052-6062.
- Rueda-Borrego M.** 2005. Estudio Teórico Sobre la Influencia del Solvente en la Estructura y Dinámica del ADN. Universidad de Barcelona, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular. [publicación en línea]. Disponible desde Internet en: <[http://www.tesisenxarxa.net/TESIS\\_UB/AVAILABLE/TDX-0629106-135551/MRB\\_TESIS.pdf](http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UB/AVAILABLE/TDX-0629106-135551/MRB_TESIS.pdf)> [con acceso el 06-May-2009].
- Sali A.** 2009. Modeller: A Program for Comparative Protein Structure Modelling by Satisfaction of Spatial Restraints. [publicación en línea]. Disponible desde Internet en: <<http://salilab.org/modeller/>> [con acceso el 06-May-2009].
- Scott W.R.P., Hünenberger P.H., Tironi I.G., Mark A.E., Billeter S.R., Fennen J., Torda A.E., Huber T., Krüger P. & W.F. van Gunsteren.** 1999. The GROMOS Biomolecular Simulation Program Package. *J Phys Chem A* 103(19):3596-3607.
- Schultz J., Milpetz, F., Bork, P. & C.P. Ponting.** 1998. SMART, a Simple Modular Architecture Research Tool: Identification of Signalling Domains. *PNAS* 95(11): 5857-5864.
- Schwede T., Diemand A., Guex N. & M.C. Peitsch.** 2000. Protein Structure Computing in the Genomic Era. *Res Microbiol* 151: 107-112.
- Schwede T., Kopp J., Guex N. & Peitsch M.C.** 2003. SWISS-MODEL: An Automated Protein Homology-Modeling Server. *Nucleic Acids Research* 31 (13): 3381-3385.
- Soares A.M., Rodrigues V.M., Borges M.H., Andriao-Escarso S.H., Cunha O.A., Homs-Brandeburgo M.I. & J.R. Giglio.** 1997. Inhibition of Proteases, Myotoxins and Phospholipases A<sub>2</sub> from Bothrops Venoms by the Heteromeric Protein Complex of *Didelphis Albiventris* Opossum Serum. *Biochem Mol Biol Int* 43(5): 1091-1099.
- Soares A.M., Marcussi S., Stábeli R.G., França S.C., Giglio J.R., Ward R.J. & E.C. Arantes.** 2003. Structural and Functional Analysis of BmjMIP, a Phospholipase A<sub>2</sub> Myotoxin Inhibitor Protein from *Bothrops moojeni* plasma. *Biochem Biophys Res Comm* 302:193-200.
- Somers W., Ultsch M., De Vos A.M. & A.A. Kossiakoff.** 1994. The X-Ray Structure of A Growth Hormone-Prolactin Receptor Complex. *Nature* 372(6505): 478-81.
- Thwin M.M. & P. Gopalakrishnakone.** 1998. Snake Envenomation and Protective Natural Endogenous Proteins: A Mini Review of Recent Developments. *Toxicon* 36(11): 1471-1482.
- Thwin M.M., Gopalakrishnakone P., Kini R.M., Armugam A. & K. Jeyaseelan.** 2000. Recombinant Antitoxic and Anti-inflammatory Factor from the Nonvenomous Snake *Python reticulatus*: Phospholipase A<sub>2</sub> Inhibition and Venom Neutralizing Potential. *Biochemistry* 39: 9604-9611.
- Weissenberg S., Ovadia M., Fleminger G. & E. Kochva.** 1991. Antihemorrhagic Factors from the Blood Serum of the Western Diamondback Rattlesnake *Crotalus atrox*. *Toxicon Volume* 29(7): 807-818.

Recibido: marzo 3 de 2008.

Aceptado para su publicación: diciembre 3 de 2008



# FILOSOFÍA DE LA QUÍMICA: UN ÁREA AMPLIAMENTE OLVIDADA

Por

Ricardo Vivas-Reyes\*

## Resumen

**Vivas-Reyes, R.:** Filosofía de la química: una área ampliamente olvidada. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(126): 125-128, 2009. ISSN 0370-3908.

La filosofía de la química es un campo relativamente nuevo de la filosofía de la ciencia, el cual ha concentrado mucho de su esfuerzo en asuntos tales como la autonomía y la identidad de la química como ciencia y su relación con su imagen manifiesta, de manera tal que pueda ser una herramienta útil que ayude a solucionar los problemas de sobrevivencia de la química como ciencia autónoma, que permita de esta forma mejorar la imagen que tienen la química y los químicos hoy en día.

La filosofía de la química, en este sentido, tiene un gran rol que cumplir en asuntos tales como el mejoramiento de la comunicación entre los químicos y el público en general.

**Palabras clave:** Filosofía de la ciencia, filosofía de la química, imagen manifiesta, imagen científica.

## Abstract

Philosophy of chemistry is a relatively new field in philosophy of science, which has concentrated many of its efforts on issues like the autonomy and identity of chemistry as a science and its relation with its manifest image, in order to be a tool that helps to solve the survival problems of chemistry as an autonomous science, that allows in this way to improve the image that chemists and chemistry have nowadays.

Philosophy of chemistry, in this sense, has a great role to accomplish in issues like improvement of communication between chemists and general public.

**Key words:** philosophy of science, philosophy of chemistry, manifest image, scientific image.

---

\* Grupo de Química Cuántica y Teórica, Universidad de Cartagena, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Programa de Química, Cartagena-Colombia.

## 1. Introducción

En general, no hay muchos químicos familiarizados con aspectos filosóficos, y aún menos se encuentran químicos relacionados con la filosofía de la química, y pueden existir muchas razones para este comportamiento, pero en el caso de la filosofía de la química, éste parece ser un comportamiento global del público científico en general. Esto a pesar de que la química ha sido y sigue siendo de gran importancia en nuestras vidas y a través de los años se ha sabido ganado el rol de ciencia central. Aunque actualmente nadie puede discutir estos hechos, sólo fue hasta hace unos pocos años que la filosofía de la química comenzó a atraer la atención de la comunidad científica (Scerri, McIntyre, 1997). En este contexto, existe una serie de pioneros de la filosofía de la química tales como Eric Scerri, Nikos Psarros y and Jaap van Brakel, quienes entendieron la necesidad de tener una filosofía química, independiente de otros tipos de filosofías de la ciencia, especialmente de la filosofía de la física. El primer problema que enfrentaron estos pioneros fue el de combatir la idea de que la química puede ser reducida a la física. (Scerri, E, R.; McIntyre, 1997b) (Van Brankel, J, 2000) En este sentido, existe un amplio pensamiento de que la química puede ser perfectamente reducida a la física, y de esta forma, la filosofía de la química también puede ser reducida a la filosofía de la física, por lo cual sencillamente no habría necesidad de tener una filosofía de la química. (Van Brankel, J, 2000, Rosemberg, A, 2000) Cualquier justificación para una filosofía química sólo puede darse entonces si la química es una ciencia autónoma. La razón principal desde el punto de vista del reduccionismo es que la química no posee leyes universales propias de la forma en que las tiene la física, mas sin embargo, la falta de leyes universales en química es un aspecto cuestionable. Primero, se ha argumentado que no existe tal cosa como leyes universales. (Scerri, E, R.; McIntyre, 1997b, Rosemberg, A, 2000) Segundo, la existencia de leyes universales, si estas existen, para considerar una ciencia como autónoma, no es un aspecto claro. Tercero, el hecho de que la química no posea leyes básicas en las cuales basarse, es también cuestionable; los químicos argumentan que leyes tales como la ley de masas y la tabla periódica de los elementos son justamente eso. Aunque estas leyes no se encuentran expresadas de la misma forma de las leyes físicas (es decir, en una estricta formulación matemática), las leyes químicas ofrecen una base para entender y explicar las propiedades de los elementos y compuestos químicos. (Van Lier, G., 2002, Van Brankel, J, 2000).

Con la Tabla Periódica la química llegó a su madurez como ciencia. Así como los axiomas de la geometría, la

física de Newton y la biología de Darwin, la química ahora posee una idea central en la cual puede cimentarse un rango completamente nuevo de las ciencias. Mendeleev clasificó los bloques constructores de la Tabla Periódica. Aunque no se encuentra escrita en una formulación estrictamente matemática en la forma de las leyes de la física, esta ley ofrece una base para la clasificación e interpretación de las propiedades de los elementos y moléculas. (Scerri, E, R.; McIntyre, 1997b, Rosemberg, A, 2000). Se ha argüido que la ley periódica es considerada en sí como una ley química y que no existen excepciones a ella. La naturaleza de la ley es tal, que no puede ser capturada por una simple relación numérica y que la regularidad intrínseca de la misma no puede ser expresada en forma nomológica utilizando conceptos no químicos. (Scerri, E, R.; McIntyre, 1997b) La ley expresa una tendencia entre las propiedades de los elementos y sus compuestos, pero si se intenta expresar dicha tendencia en forma numérica, tal relación sólo se mantiene en forma aproximada. De esta forma, la ley de periodicidad se mantiene como una ley autónoma de la química. (Scerri, McIntyre, 1997) (Scerri, E, R.; McIntyre, 1997b) Los químicos de hoy en día enfrentan también otra clase de problema tal como es la identidad de la química en sí misma, y la filosofía de la química no puede ser ajena a esto. En este artículo se discute el problema de la identidad de la química y su relación con la autonomía de la química como ciencia. Estos problemas de identidad y autonomía de la química serán discutidos en relación con su imagen manifiesta. (Scerri, McIntyre, 1997a,b)

## 2. Identidad de la química

No existe duda alguna de que la química es una ciencia realmente exitosa, pero a pesar de todos sus grandes logros, no está recibiendo el reconocimiento que se merece. Existen muchas razones para esto, y algunas de esas razones se tratarán de explicar aquí. La química puede ser definida de diferentes formas, sin embargo, una buena definición podría ser: "La Química es el estudio de los elementos y de los compuestos que estos forman y sus transformaciones. La química se ocupa principalmente de los efectos que dependen de los electrones más externos de los átomos" (Psarros, 1998). A partir de estas definiciones es posible afirmar que el campo de la química es muy amplio; la química se ocupa de sistemas que se encuentran en el rango que comprende desde el nivel atómico hasta el macroscópico. En el nivel atómico, la química en su mayoría no tiene en cuenta la estructura de protones, neutrones y núcleos, lo cual es el campo de la física nuclear y de partículas elementales. (Van Lier, G., 2002) A la inversa, desde sus principios básicos, la química considera construcciones tales como átomos, moléculas, polímeros y materiales macroscópicos,

y los manipula entonces de vuelta hacia el mundo físico (**Nature** 2001,a,b). Es muy conocido que la química es la ciencia central, teniendo a un lado la física y las matemáticas, y del otro lado la biología, la geología e incluso algunas ciencias sociales relacionadas. (**Van Lier, G.**, 2002) De esta forma, es posible afirmar que la física puede ser visualizada como una ciencia con una estructura más vertical, basada en un grupo de leyes muy bien alineadas; por otra parte, la biología parece ser una ciencia más horizontal, con un amplio rango de campos menos relacionados entre sí. La química ocupa una situación intermedia entre estas dos ciencias, con leyes menos generales, aplicables bajo ciertas condiciones; la tabla periódica de los elementos es un perfecto ejemplo de estas leyes. (**Scerri, E. R.; McIntyre**, 1997b) (**Van Brankel, J.**, 2000) La química parece colocarse como una ciencia central debido a sus múltiples relaciones con otras ciencias; este punto de vista es soportado por la familiaridad con otras ciencias, lo que hace posible la creación de otras ramas o subcampos tales como: fisicoquímica, química-física, bioquímica, geoquímica, química computacional, etc, las cuales son representativas de todo el éxito que la química ha tenido y sigue teniendo. Ésta parece ser la imagen de una ciencia dinámica y fluorescente en la cima de su propio éxito. Pero existe una contra-cara a todo este éxito; la química puede beneficiarse de las muchas colaboraciones con otras disciplinas, pero esto, por otra parte, tiende a disipar el campo tratado exclusivamente por la química. El núcleo de esta ciencia puede estar bajo el ataque de subcampos emergentes y esto podría no dejar mucho campo de acción para la química fundamental en el futuro (**Van Lier, G.**, 2002).

Muchos investigadores químicos reclaman que la química simplemente parece no sonar bien bajo otros nombres y que los límites o fronteras de la química podrían ser borrados por dichas colaboraciones; por estas razones algunos investigadores químicos sostienen que es tiempo de que la química reclame sus propios logros. La mayoría de las partes más interesantes de la química terminan por llamarse de otra forma excepto química. Como un ejemplo de esto, mucho del trabajo en biología actualmente depende de la química. Los primeros trabajos con ADN fueron realizados por químicos, ya que es imposible obtener ADN sin procedimientos sintéticos para la síntesis de ácidos nucleicos y de geles para la separación de los mismos; sin embargo, todo esto hoy día es llamado biología.

Si un subcampo necesita partes de la química pura o de alguna investigación de laboratorio para el desarrollo del campo, los químicos precisan reclamar que todos estos logros realizados por este subcampo no podrían ser alcanzados sin un estudio profundo de conceptos y principios químicos. Los químicos también necesitan resaltar que la

intuición química y su forma de pensamiento son fundamentales, y que conceptos tales como propiedades químicas, enlace químico y estructura molecular, son piezas de gran importancia para entender, por ejemplo, campos tales como biología molecular, nanotecnología, diseño de fármacos, aplicaciones médicas como resonancia magnética (MRI), y la lista es amplia. Estas evidencias son el principal argumento en contra de la imagen común que tienen muchos químicos y físicos quienes argumentan que la química puede ser reducida en principio derivados de la física, como ha sido la visión de científicos muy respetables como Dirac, Heisenberg, Feynman entre otros (**Van Brankel, J.**, 2000).

### 3. Relación con la imagen manifiesta

La terminología de la imagen manifiesta versus la científica comienza con Seller (**Van Brankel, J.**, 2000). La primera es la práctica diaria o el sentido común humano; se refiere a cosas como el agua, la injusticia, etc. También implica la sofisticada interpretación de las personas y las cosas en el mundo. La imagen científica se ocupa de cosas tales como neuronas, ADN, quarks, la ecuación de Schrödinger, etc. La distinción entre estas imágenes es frecuentemente realizada por los filósofos (**Van Brankel, J.**, 2000).

La imagen usualmente formulada en términos de imagen manifiesta está relacionada con la visión externa que tenemos de una ciencia. En el caso de la química, su relación con la imagen manifiesta es a veces muy problemática; a pesar de haber tenido grandes éxitos y aplicaciones en nuestra vida cotidiana, la práctica de la química se encuentra casi siempre relacionada para los ciudadanos del común con problemas tales como: contaminantes, calentamiento global, PCB'S, dioxinas, problemas ambientales, cambios climáticos, efecto de invernadero, problemas con la capa de ozono, etc. Esto quiere decir que algunas veces el éxito de la química se encuentra enfrentado con un desinterés general por la química e incluso un disgusto manifiesto por parte de la sociedad en general, debido a que todos estos problemas anteriores son inmediatamente trasladados a la química, haciéndola la villana causante de todos estos desastres. Esta aproximación paradójica alrededor de la química es muy peligrosa para la imagen de la química, y por esta importante razón se ha visto la necesidad de encontrar los factores que están dañando la relación entre la química y su imagen manifiesta.

¿Cómo resolver estas interrogantes y cómo encontrar la forma de rescatar la química? Primero, es necesario exponer que la química está gobernada por un concepto de conocimiento relacionado con la acción, distinto al énfasis en la formalización y matematización propias de la física. Este

punto de vista no enfatiza simplemente el aspecto interactivo del lado experimental de la esta ciencia. (Van Brankel, J, 2000, Schummer, J. a, b.) El hecho de que la química desarrolla constantemente nuevas sustancias es quizás percibido algunas veces como innatural por el público, y, en forma equivocada, ésta es principalmente la base de su relación con su imagen manifiesta. Es este aspecto de la química el que se encuentra más en contacto con la sociedad.

En la literatura científica cotidiana, la química se encuentra totalmente ausente, en contraste con la física, la ciencia computacional, biología e incluso las matemáticas. Casi no existe nadie que comunique la emoción que los químicos comparten por su campo con el público en general. Sorprendentemente, la mayor parte de la comunicación entre la química y el público actualmente se origina a partir de la industria química, y aunque esto es importante para mostrar el progreso hecho por la química, esta clase de comunicación no sirve a las mismas metas, en la misma forma en que la ciencia y la tecnología tampoco poseen los mismos objetivos. (Van Lier, G., 2002, Schummer, J.b) Mientras que la comunidad científica se interesa primordialmente en investigación y desarrollo, la industria química se comunica en términos de desarrollo y beneficio. La falta de comunicación en aspectos fundamentales de la química ciertamente contribuye a distorsionar la forma en la cual el público general percibe la química. Hoy en día, existe una gran preocupación por asuntos ambientales como el cambio climático, el calentamiento global y la capa de ozono como se anotó anteriormente, y el público, una vez más percibe a la química como una de las grandes responsables por estas catástrofes. Esta imagen debe cambiarse; la química en este caso debería mostrarse como una parte de la solución a los problemas y no como su causante, afianzando el camino para tener una mejor relación e imagen con el público en general.

#### 4. Conclusiones

Es posible afirmar que conceptos como sustancia pura son metodológicamente, epistemológicamente y antológicamente, independientes de la química molecular y de la mecánica cuántica, y dependientes de la intuición manifiesta de sustancia pura, la cual encuentra su más científicamente y precisa contraparte en la termodinámica de las sustancias; aunque frecuentemente se asume que las sustancias puras pueden ser definidas en términos de composición (atómica) y estructura (molecular), definiciones estrictamente macroscópicas son de igual forma posibles. Por ejemplo, una sustancia pura es tal que sus propiedades macroscópicas como la temperatura, densidad y conductividad eléctrica, no cambian durante una conversión de fase. Este es uno de los argumentos usados en contra de la idea de que la química puede ser reducida a la

física y es por esta razón que es necesaria una filosofía de la química.

Los químicos deben enfrentar a una creciente quimiofobia. Tal hostilidad por parte del público tiene su raíz en una multiplicidad de factores como la preocupación ambiental y la polución. La supervivencia de la química como ciencia depende de la capacidad de los químicos para identificar cierta clase de problemas de comunicación con el público en general, que emergen debido a la falta de una buena comprensión de la relación entre la química y su imagen manifiesta, la cual necesita ser revisada y analizada con el fin de obtener un mejor entendimiento de la percepción que la gente tiene de la química y de su utilidad en la vida diaria. Todos estos aspectos deben ser analizados por la filosofía de la química.

La filosofía de la química ya emerge como un área de legítima investigación filosófica que reclama nuestra atención; el mejor trabajo que puede realizarse ahora por los químicos en esta área abandonada, es el intento de entender esta clase de asuntos con el fin de mostrar su importancia en muchos aspectos de la química, tal como contribuir a cambiar en algo la imagen negativa que las personas tienen de la química, formulando una comunicación más imparcial entre la química y la población en general, para lo cual es vital hacer una didáctica de la química que llegue a un público más amplio y que lo impacte de forma positiva y esto se puede lograr haciendo que la química sea más amigable en asuntos tales como los medio-ambientales que hoy en día impactan más a nuestra sociedad.

#### 5. Bibliografía

- Rosemberg, A. 2000. *Phylosophy f Science; A contemporary introduction*; Routledge: London.
- Scerri, E, R.; McIntyre, L. 1997a. Editorial. *Syntheses*, 111, 211.
- \_\_\_\_\_. 1997b. The case for the pylosophy of chemistry. *Syntheses*, 111, 213-232.
- Schummer, J. 1995. *Scientometric studies on chemistry: the exponetial growth of chemical substances, 1800*, *Scientometrics*, 39: 107. 121.
- Schummer, J. 1997. *Challeging standard distintions between science and technologoy: The case of preparative chemistry*, *Hyle*, 3, 81-94 Del Re. G. Hyle, Technology and the spirit of alchemy.
- Van Brankel, J. 2000. *Phylosophy of Chemistry*; Leuven University Press: Leuven.
- Van Lier, G. 2002. *A Decade The phylosophy of chemistry*. Anexa Doctoral Thesis, Vrije Univesitet Brussel (VUB).
- Correspondece articules. *Nature*. 2001, 412, 117.
- Opinion articule, *Nature*, 2001, 411, 399-400.

Recibido: octubre 28 de 2008

Aceptado para su publicación: febrero 24 de 2009

# ASOCIACIONES Y PATOLOGÍAS EN LOS CRUSTÁCEOS DULCEACUÍCOLAS, ESTUARINOS Y MARINOS DE COLOMBIA: AGUAS LIBRES Y CONTROLADAS

Por

Ricardo Álvarez-León\*

## Resumen

**Álvarez-León, R.:** Asociaciones y patologías en los crustáceos dulceacuícolas, estuarinos y marinos de Colombia: aguas libres y controladas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33**(126): 129-144, 2009. ISSN 0370-3908.

Se presenta por primera vez, una síntesis de la información existente sobre las diferentes asociaciones que presentan los crustáceos nativos y exóticos, tanto en aguas libres como en el desarrollo de proyectos de acuicultura. Es importante resaltar como en los ambientes dulceacuícolas, los tremátodos (1) e isópodos (2), así como en los ambientes estuarinos y marinos, los virus (10), bacterias (22), hongos (2), protozoos (3), helmintos (1), isópodos (15), copépodos (15), cirripedios (6), hacen parte de los organismos asociados a los crustáceos dulceacuícolas, estuarinos y marinos. Dentro de las asociaciones halladas en los arrecifes del Caribe colombiano, sobresalen la existencia de camarones limpiadores (2) y peces (29). Finalmente se ofrecen comentarios sobre las consideraciones carcinopatológicas para su control y manejo en ambientes confinados.

**Palabras clave:** parásitos, simbiosis, carcinopatología, Colombia.

## Abstract

It is presented for the first time, a synthesis of the existing information on the different associations of the native and exotic crustaceans, as much in free waters as in the development of aquaculture projects. It is important to stand out like in environmental fresh waters, the trematods (1) and isopods (2), as well as in the environmental estuarines and marines, the virus (10), bacteria (22), mushrooms (2), protozoas (3), helminths (1), isopods (15), copepods (15), cirripeds (6), they make part of the organisms associated to the crustaceans fresh waters, estuarines and marines. Within the associations found in the reefs of the Colombian Caribbean, exists between cleaning shrimp (2) and fish (29) stand out. Finally, comments on the carcinopathological considerations for their control and handling in confined areas are made.

**Key words:** parasites, symbiosis, carcinopathology, Colombia

---

\* Fundación Maguaré. Manizales (Caldas) Colombia. Correo electrónico: alvarez\_leon@hotmail.com

## Introducción

Se ha comprobado que Colombia es uno de los tres principales países (Brasil e Indonesia, son los otros dos) con megadiversidad, siendo que apenas representa el 13.4% de la extensión de Brasil y el 59.6% de la de Indonesia, lo cual hace que su biodiversidad por unidad de superficie sea muy grande. Colombia ocupa el 0.77% de la superficie terrestre del planeta, pero se estima que cuenta con el 14-15% de la biodiversidad terrestre total. No obstante, Colombia también posee parte de los hotspots más amenazados del planeta, el de los Andes tropicales (número uno en la lista mundial) y el del Chocó / Darién / Ecuador Occidental. Así mismo, las tierras bajas amazónicas de Colombia, pertenecen a la principal zona pristina tropical de la alta Amazonía. Colombia cuenta además con 10 centros de diversidad y endemismo vegetal identificados por la WWF y la IUCN, y con 14 áreas de endemismo de aves, delimitada por la ICBP. La diversidad de ecosistemas también es asombrosamente alta —quizá la mayor del mundo— con por lo menos 99 unidades biogeográficas identificadas hasta la fecha, pues contribuyen la ubicación tropical del país, su variedad de climas y su historia geológica, con todas sus consecuencias: numerosas cuencas fluviales, dos costas en el Océano Pacífico y el Mar Caribe, con sus variados ecosistemas (arrecifes coralinos, manglares, pastos marinos, playas arenosas y rocosas, esteros, estuarios, ciénagas, lagunas e islas continentales y oceánicas), las tres cordilleras andinas y los macizos aislados, la diversidad de ecosistemas de selva húmeda y de pastizales (Álvarez-León, 1999a).

La diversidad de crustáceos decápodos dulceacuícolas y marinos es elevada, por las enormes extensiones de las diferentes cuencas fluviales, marinas y submarinas. Se ha estimado que en las aguas dulces que vierten sus aguas al Caribe colombiano se han encontrado 31 especies (Rathbun, 1915; Pearse, 1916; Martínez-Silva, 1974; Escobar, 1979; Rocha de Campos, 2005). En los mares colombianos a excepción de los cálculos realizados por Lemaitre y Álvarez-León (1997), cuando afirmaron que con base en los estudios realizados hasta el momento, existían 378 especies en el Pacífico colombiano, y Campos-Campos y Lemaitre (2001) y Campos-Campos *et al.* (2003), que afirmaron que también con base en los estudios realizados existen 558 especies para el Caribe colombiano. En las aguas continentales nada se ha especulado sobre el total de especies de crustáceos, exceptuando aportes sobre algunas familias susceptibles de cultivos controlados, especialmente Palemonidae.

No obstante, se espera que el número de especies pueda ser mayor si se tienen los ríos que conforman las diferentes cuencas hidrográficas nacionales y los ríos cuyas

cuencas se comparten con Venezuela (Catatumbo, Zulia, Meta, Orinoco), con Brasil (Amazonas, Caquetá, Isana, Vaupés, Apoporis, Negro), con Perú (Putumayo, Amazonas), y con Ecuador (Mira, San Miguel, Putumayo, Caquetá), cuya presencia en nuestro territorio es perfectamente posible y prácticamente segura, estamos lejos de conocer en detalle nuestros crustáceos y su número exacto.

Los vacíos existentes incluyen por tanto: (1) completar el inventario nacional, (2) conocer el real estado de las especies sometidas al aprovechamiento tanto artesanal como industrial, (3) precisar épocas de reproducción y de reclutamiento, (4) actualizar las cuotas vigentes de pesca tanto industrial como artesanal, (5) establecer vedas parciales y totales, (6) precisar los impactos de los crustáceos introducidos en la carcinofauna nacional, (7) conocer la carcinopatología tanto de los crustáceos dulceacuícolas como estuarinos y marinos, así como los tratamientos necesarios.

Respecto a la carcinopatología en Colombia, vale la pena señalar que sus antecedentes se remontan a finales de los setenta, cuando se discutió y aprobó el Proyecto INDERENA / FAO para el Desarrollo de la Pesca Continental en Colombia, DP / COL / 71 / 552, se incluyó como uno de los insumos más importantes, el componente de la patología, con objeto de hacer un diagnóstico nacional del estado de las poblaciones naturales y confinadas, tanto en aguas dulces como marinas y estuarinas, especialmente teniendo en cuenta la naciente actividad de la acuicultura. Inicialmente con el apoyo del proyecto se comenzó a implementar un laboratorio de patología con sede en Bogotá, luego se realizaron múltiples visitas al territorio nacional para dar a conocer las estrategias de trabajo e identificar los líderes en cada estación de actividad pesquera o acuícola, también se trabajó en la capacitación hacia el interior del INDERENA y posteriormente hacia toda la comunidad científica nacional. En la costa Caribe los estudios sobre las poblaciones nativas de *Macrobrachium* spp. permitieron hallar el isópodo *Bopysus squillarum* en ejemplares de *M. acanthurus*, pero según informes de L. E. Martínez-Silva, el parásito no tuvo mayor efecto sobre el comportamiento general de la especie (Conroy y Vásquez-Díaz, 1975).

Los crustáceos se trataban con sal común, azul de metileno y un alto porcentaje de antibióticos, y en general con productos y compuestos de uso generalizado en el mercado mundial, especialmente orientados a la acuicultura. Los trabajos e investigaciones del personal del Proyecto INDERENA / FAO, también generaron información útil en los aspectos preventivo y curativo, introduciéndose al país los medicamentos bacosán, furanace, masotén y povisán, que permitieron realizar un efectivo control de

las enfermedades detectadas en los peces dulceacuícolas de Colombia. Sin embargo, teniendo en cuenta los problemas sanitarios de los crustáceos, ante todo se trata de tener una óptima calidad de las aguas, desinfección de todas las instalaciones, pero si se presentan enfermedades, éstas se tratan con métodos prácticos, sencillos y artesanales que incluyen el uso de sal común, alcohol etílico, formaldehído, ácido acético glacial, hiamina, furazolidona, furanace, cloranfenicol, terramicina, EDTA, cutrine plus, trifuralin, verde de malaquita, azul de metileno, cloro, cloroquina difosfato, sulfato de cobre entre los principales; el trabajo se ha tecnificado a tal punto que se están realizando bioensayos para estudiar los diferentes agentes patógenos y la obtención de stocks de crustáceos principalmente de camarones marinos resistentes (Vallejo-Isaza & Newmark-Umbreit, 1997).

### Crustáceos dulceacuícolas

Fruto de estas actividades del Proyecto INDERENA / FAO, también generó información útil en los aspectos preventivo y curativo. La introducción de los medicamentos bacosán, furenace, masotén y povisán, permitieron realizar un efectivo control de las enfermedades detectadas en los crustáceos dulceacuícolas de Colombia. Como ya se manifestó los problemas sanitarios de los crustáceos se trataban con métodos artesanales que incluían el uso de sal común, azul de metileno, verde de malaquita, formol, vermífugos, extractos de plantas y un alto porcentaje de antibióticos especialmente el cloranfenicol (Conroy & Vásquez-Díaz, 1975).

Otro aporte que vale la pena señalar son las tesis profesionales que permitieron profundizar en diversos aspectos de la carcinología de los crustáceos nativos y exóticos de consumo y ornato. En estos aspectos se encuentran los trabajos realizados en la década de los noventa, especialmente sobre los camarones de agua dulce del género *Macrobrachium* spp. (Martínez-Silva, 1970; González-Solano & Guerrero-Muñoz, 1977; Llanos & Jaramillo-Montes, 1979; Azcona, 1983; Borrero-Herrera, 1983)

Trabajos de investigación como los de Martínez-Silva (1974, 1975a, 1975b) y Escobar (1979), aportaron en su momento información valiosa para los ensayos de cultivo controlado.

Las ictiozoonosis o enfermedades transmitidas al ser humano por bacterias, virus y parásitos, a través del consumo de peces, crustáceos o mariscos, de productos pesqueros y de productos de la acuicultura, han sido poco estudiadas. Aunque existe una amplia variedad de parási-

tos que pueden infectar al pescado y los mariscos, sólo un número reducido puede causar enfermedades al ser humano. En Colombia sólo se ha registrado la presencia del género *Paragonimus* en el Pacífico, cuyo primer hospedador intermediario es un molusco gasterópodo y como segundo, un cangrejo de agua dulce (*Hypobolocera*), la enfermedad se adquiere por el consumo del cangrejo crudo o insuficientemente cocido. El *Paragonimus* parasita los pulmones del ser humano, donde induce síntomas frecuentemente confundidos con la tuberculosis. En la fase aguda de la infección (invasión y migración) los síntomas clínicos son: diarrea, dolor abdominal, fiebre, tos, urticaria, hepatoesplenomegalia (agrandamiento del hígado y el bazo) y eosinofilia; la fase crónica (invasión pulmonar), tiene como síntomas: tos, hemoptisis (presencia de sangre en el esputo), dolor pulmonar; si el parásito se sitúa en el cerebro las manifestaciones suelen ser muy graves (Quijada *et al.*, 2005).

### Crustáceos marinos

Con relación a los crustáceos marinos y estuarinos, las investigaciones se han realizado en varios de los ecosistemas más representativos del Caribe, como son las partes bajas y las desembocaduras de los ríos con camarones de cultivo (Bríñez *et al.*, 2003a, 2003b; Brock, 1995, 1996; Vallejo-Isaza & Newmark-Umbreit, 1997; Granja *et al.*, 2003; Vidal *et al.*, 2001; Gautier, 2002; Suárez-Navarrete, 2002; Aranguren-Caro *et al.*, 2003); en la región de Santa Marta con asociaciones entre cangrejos, equinodermos y peces (Werding & Sánchez-Moreno, 1984; Schoppe, 1995; Schoppe & Werding, 1996; Álvarez-León, 2000); en la Bahía de Cartagena con asociaciones entre copépodos y peces (Álvarez-León & Overstreet, 2003); en la Ciénaga Grande de Santa Marta con asociaciones entre jaibas y cirrípedos (Álvarez-León & Blain-Garzón, 1989; Álvarez-León, 1999b); en arrecifes coralinos (Bunkley-Williams & Williams, 1981; Williams *et al.*, 1994; Bunkley-Williams *et al.*, 1999; Álvarez-León, 2004); en lagunas costeras con asociaciones entre cirrípedos y cangrejos (Álvarez *et al.*, 2003); asociaciones entre crustáceos limpiadores y peces (Corredor-Arias & Criales-Gutiérrez, 1977; Criales-Gutiérrez & Corredor-Arias, 1977; Criales-Gutiérrez, 1979), y en ambientes oceánicos con asociaciones entre copépodos y peces (Cressey & Cressey, 1980; Cressey *et al.*, 1983).

En el Pacífico, existen los trabajos de Ramos-Tafur *et al.* (1994) en peces y Álvarez-León (1999) en jaibas acompañantes de la pesca del camarón de aguas someras; el de Cressey & Cressey (1980) y Cressey *et al.* (1983) sobre peces pelágicos y pelágico-costaneros.

Un caso especial registrado en el Caribe colombiano es la presencia del isópodo *Rocinella signata* que atacó a un buzo en Bahía Portete (12° 07' N y 72° 02' W; INVEMAR-CR 1086), lo cual permite incluir a esta especie como parásito facultativo, pues también ataca un amplio espectro de vertebrados (rayas, tiburones, perciformes y ahora hombres) (Garzón-Ferreira, 1990).

Las tesis profesionales también vale la pena resaltarse pues permitieron profundizar en diversos aspectos de la carcinopatología de los crustáceos nativos de consumo. En este aspecto se encuentran los trabajos realizados en la década de los 90's sobre camarones de cultivo (Riaño-Silva, 1990; Martínez-Poinsenet & Osorio-Pérez, 1995; Saavedra-Bucheli, 1995; Vallejo-Isaza, 1996; González-Cendales, 1997; Pérez-Bravo & Pimienta-Gómez, 1997)

## Resultados

La síntesis realizada permitió recopilar tanto en crustáceos nativos como exóticos, la información sobre las asociaciones existentes en aguas libres y aguas confinadas. Es importante resaltar como en los ambientes dulceacuícolas, los trematodos (1) e isópodos (2), en ambientes estuarinos y marinos, los virus (10), bacterias (11), hongos (2), protozoos (3), helmintos (1), isópodos (15), copépodos (15), cirripedios (6). Dentro de las asociaciones halladas en los arrecifes del Caribe colombiano, sobresalen las asociaciones entre camarones limpiadores y peces. Finalmente se ofrecen comentarios sobre las consideraciones carcinopatológicas para su control y manejo en ambientes confinados.

La FAO a finales de la década de los sesenta inició la generación de una base de datos sobre especies introducidas. Como resultado de esta iniciativa, Welcomme (1981) registró 1354 especies introducidas a aguas continentales en 140 países. Según Welcomme (1988), el 90% de las introducciones de peces son debidas a acciones deliberadas y el 10% a las involuntarias o denominadas "introducciones accidentales", y se deben, según Benson *et al.*, (2001) a los escapes de especies cultivadas en granjas, en acuarios de ornamentales y en actividades derivadas de la pesca deportiva. Shelton & Smitherman (1984) postulan que las fugas de las especies de cultivo son inevitables y Welcomme (1988) afirma que las especies utilizadas en acuicultura eventualmente pasan al medio natural y por lo tanto cualquier introducción con fines de cultivo es una adición potencial a la fauna silvestre.

Álvarez-León (1982) así como Álvarez-León & Rodríguez-Forero (2000) han registrado el progresivo aumento de las introducciones de crustáceos con destino a la acuicultura en Colombia. Recientemente, Alvarado-Forero & Gutiérrez-Bonilla (2002) al igual que Álvarez-León *et al.* (2002) y Álvarez-León & Gutiérrez-Bonilla (2007) han corroborado en detalle la introducción y trasplante de especies dulceacuícolas, así como sus efectos en la fauna nativa o silvestre.

Los crustáceos dulceacuícolas, estuarinos y marinos han sido estudiados tanto en su medio natural, en parte por el número de introducciones realizadas con destino a la producción de la acuicultura y los altos precios obtenidos en diversos países del mundo y el desarrollo que ha venido alcanzando la carcinocultura (Álvarez-León, 1982; Álvarez-León & Rodríguez-Forero, 2000).

Las especies y la familia estudiadas, en las cuales se han encontrado asociaciones con diferentes grupos, han sido: *Macrobrachium carcinus* y *M. acanthurus* (Palaemonidae).

Los crustáceos estuarinos y marinos, en cambio, han sido estudiados más intensamente en su medio natural, como en los ambientes confinados. Algunas especies se han evaluado en cuanto a su potencial aprovechamiento a través de cultivo, por lo que las etapas de experimentación han tenido diferentes orientaciones (Álvarez-León, 1982; Álvarez-León & Rodríguez-Forero, 2000) y a comienzos de la década de los noventa, se ha iniciado el desarrollo de la camaronicultura industrial.

Las especies y la familia estudiadas, en las cuales se han encontrado asociaciones con diferentes grupos, han sido: *Litopenaeus stylirostris* y *L. vannamei* (Litopennaeidae).

La realización de esta primera revisión exhaustiva sobre las diferentes asociaciones detectadas en los crustáceos de Colombia, permite corroborar la presencia de especies parásitas y simbióticas en las aguas libres así como la alta probabilidad de que la introducción de especies exóticas ocasionan alteraciones en los ecosistemas invadidos, al introducirse sus organismos asociados o de ser afectadas por los organismos nativos y a veces endémicos asociados a estos ecosistemas.

El hallazgo de *Bursatella leachi pleii* (Rang, 1828) un molusco opistobranquio de la familia Notarchidae, en las camaroneras vecinas a la Bahía de Barbacoas donde se cultivaba el camarón nativo *Litopenaeus schmitti*, y los camarones transplantados del Pacífico colombiano *L. stylirostris* y *L. vannamei*, permitió analizar las dificultades que presenta dicho organismo como asociado a los cultivos de camarón. Es evidente la obstrucción y competencia en el desplazamiento, la alimentación de los camarones, y la demora causada en la colecta de los estanques (limpieza de los camarones antes de congelarse y de los estanques antes de reutilizarlos) (Álvarez-León y García-

**Pérez (1993)**. Los trabajos que fueron desarrollándose en las camaronerías, permitieron ir conociendo y tratando las enfermedades (**Alonso et al.**, 1990; **Astudillo-Sevillano & Muñoz-Arroyabe**, 1993), e ir conociendo los problemas asociados a la alimentación (**Saavedra-Bucheli**, 1995; **Ferix-Campo**, 1996; **Saavedra-Bucheli et al.**, 2008).

Quizá el problema más serio que enfrentaron las camaronerías del país fue la aparición del síndrome del Taura, al parecer procedente del Perú y del Ecuador, debido a la introducción de postlarvas de *L. vannamei*. El síndrome del Taura, también conocido como TSV, es causado por un virus de RNA y pertenece a la familia Picornaviridae (**Vallejo**, 1996; **Vallejo y Newmark**, 1997; **Aranguren et al.**, 2003).

A partir de las siembras en la temporada lluviosa de 1992 (enero a abril) las camaronerías de Churute (desembocadura del río Taura) se comenzaron a experimentar una inusual y elevada mortalidad del camarón. Cortes histológicos de los camarones de la zona, revelaron cambios importantes en la organización celular de órganos y tejidos, principalmente, (1) hipertrofia y deformación de nucleos y nucleólos en la glandula antenal, (2) hipertrofia en células del hepatopáncreas y (3) severa necrosis multifocal en la epidermis cuticular y frecuentemente en los tejidos subcuticulares. La incidencia del síndrome se expandió progresivamente hasta llegar en 1993 a afectar las islas del interior del Golfo de Guayaquil. Después aparecieron los síntomas en Tumbes (Perú), Tumaco (Colombia), Honduras y Hawaii (USA). Ésta situación y el competitivo mercado mundial de camarón, llevó a que grupos camaroneros ecuatorianos comenzaron a invertir en Centroamérica (Honduras y Costa Rica en 1992, así como Guatemala y México en 1993) (**Anónimo**, 1994, 1995).

En Colombia, para enfrentar la emergencia, se diseñaron y formularon varios proyectos de investigación que incluyeron el análisis de los diferentes aspectos (biológicos, microbiológicos, genéticos, tecnológicos, biotecnológicos entre otros) y el concurso de numerosos investigadores nacionales e internacionales, con resultados amplios y valiosos (**Newmart-Umbreit et al.**, 1997; **Vargas-Sánchez et al.**, 1997; **Suárez-Navarrete et al.**, 1998), que han permitido el conocimiento, el manejo y la solución de los problemas

que han traído diferentes enfermedades de los camarones de cultivo (**Suárez-Navarrete**, 2002). Las investigaciones han cubierto aspectos tales como: genéticos vs. WSSV, (**Gitterle-Santamaría et al.** 2005a, 2005b, 2006a, 2006b, 2007), espiroplasmosis (**Nunan et al.**, 2004), hipertermia (**Vidal et al.**, 2001), apoptosis (**Granja et al.**, 2003, 2006), NHP (**Briñez et al.**, 2003a, 2003b), **Aranguren-Caro et al.**, 2006), buenas prácticas de manejo (**Gautier**, 2002), TSV, IHNV, WSSV, YHV -enfermedades en América- **Laightner** (1999), enfermedades en Colombia, **Vallejo-Isaza** (1996) y **Aranguren-Caro et al.** (2006), enfermedades inducidas y bioensayos, **Castillo-Rojas** (1999), **Galán-Mejía** (1999), **Gitterle-Santamaría** (1999), **Barragán-Becerra** (2001), **Roa-Angulo** (2001), **Varela de Ávila** (2001), **Vargas-Sánchez et al.** (2001a, 2001b, 2001c) y **Vidal-Orjuela** (2001).

Los procedimientos previos a la toma de decisiones respecto a las introducciones y / o trasplantes, deberían activarse para responder a las diversas situaciones que se presentan por lo general, máxime si Colombia es partícipe de la Comisión de Pesca Continental para América Latina, así como miembro de la FAO y del Consejo Internacional para la Exploración del Mar. Este compromiso internacional obliga al país a adoptar medidas drásticas para impedir la introducción de especies no autorizadas o no aprobadas, y el trasplante de especies nativas con fines comerciales de acuicultura controlada o de repoblación (**Gutiérrez-Bonilla**, 2001; **Alvarado-Forero & Gutiérrez-Bonilla**, 2002; **Álvarez-León et al.**, 2002).

La fauna de crustáceos de aguas interiores colombianas es probablemente tan diversa y productiva como para traer especies foráneas. Puede ser excesivamente peligroso introducir especies prolíficas y poco exigentes, pues en ciertos medios ecológicos podrían dominar en detrimento de las especies nativas. Aún así, las especies se han introducido y están en cuencas donde existen alteraciones medioambientales y pocas barreras ecológicas que hagan presumir un fácil control. En ciénagas de las cuencas de los ríos Magdalena, Cauca, San Jorge, Sinú y Cesar, en donde ha ocurrido una disminución de la profundidad media asociada al aumento de las macrófitas acuáticas (*Eichhornia azurea*, *E. crassipes*) (**Álvarez-León et al.**, 2002).

**Tabla 1.** Exoparásitos y endoparásitos hallados en crustáceos agua dulce de Colombia, entre 1975 y 2005.

| Phylum / Clase | Orden / Familia | Parásito                      | Huésped                                      | Autor (es)                            |
|----------------|-----------------|-------------------------------|--|---------------------------------------|
| Trematoda      |                 | <i>Paragonimus</i> sp.        | <i>Hypolobocera</i> sp.                      | Quijada et al. (2005)                 |
| Crustacea      | Isopoda         | <i>Bopyrus squillarum</i>     | <i>Macrobrachium acanthurus</i>              | Conroy y Vásquez (1975)               |
|                |                 | <i>Probopyrus pandalicola</i> | <i>M. acanthurus</i> . <i>M. rosenbergii</i> | Álvarez (1993), Álvarez et al. (1999) |

Tabla 2. Parásitos hallados en crustáceos y peces estuarinos y marinos de Colombia, entre 1974 y el 2003.

| Phylum / Clase | Orden / Familia          | Parásito                              | Huésped   | Autor (es)   |                        |
|----------------|--------------------------|---------------------------------------|---|--|------------------------|
| <b>Virus</b>   |                          | <i>Baculovirus penaei</i>             | <i>Litopenaeus stylirostris</i> ,<br><i>L. vannamei</i> | Martínez y Osorio (1995)   |                        |
|                |                          | <i>Baculovirus</i> sp. (tipo monodon) | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995), Vallejo (1996), Vallejo y Newmark (1997) |                        |
|                |                          | <i>Baculovirus</i> sp.                | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995), Aranguren <i>et al.</i> (2003)           |                        |
|                |                          | <i>Parvovirus</i> sp.                 | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995), Aranguren <i>et al.</i> (2003)           |                        |
|                |                          | <i>Reovirus</i> spp                   | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995)   |                        |
|                |                          | <i>Tagavirus</i> spp.                 | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995), Vallejo (1996), Vallejo y Newmark (1997) |                        |
|                |                          | <i>Vibrio anguillarum</i>             | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996), Páez y Pimienta (1997)                             |                        |
|                |                          | <i>Vibrio alginolyticus</i>           | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996), Páez y Pimienta (1997)                             |                        |
|                |                          | <i>Vibrio carchariae</i>              | <i>L. vannamei</i>                                      | Páez y Pimienta (1997)   |                        |
|                |                          | <i>Vibrio cholerae</i>                | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996)   |                        |
|                |                          | <i>Vibrio damsella</i>                | <i>L. vannamei</i>                                      | Páez y Pimienta (1997)   |                        |
|                |                          | <i>Vibrio fluvialis</i>               | <i>L. vannamei</i>                                      | Páez y Pimienta (1997)   |                        |
|                |                          | <i>Vibrio harveyi</i>                 | <i>L. vannamei</i>                                      | Astudillo y Muñoz (1993), Páez y Pimienta (1997)                   |                        |
|                |                          | <i>Vibrio parahaemolyticus</i>        | <i>L. vannamei</i>                                      | Páez y Pimienta (1997)   |                        |
|                |                          | <i>Vibrio splendidus</i>              | <i>L. vannamei</i>                                      | Páez y Pimienta (1997)   |                        |
|                |                          | <i>Vibrio vulnificus</i>              | <i>L. vannamei</i>                                      | Páez y Pimienta (1997)   |                        |
|                | <b>Bacterias</b>         |                                       | <i>Aeromonas</i> sp.                                    | <i>L. vannamei</i>   | Vallejo (1996)         |
|                |                          |                                       | <i>Aeromonas hydrophila</i>                             | <i>L. vannamei</i>   | Páez y Pimienta (1997) |
|                |                          | <i>Bacillus</i> sp.                   | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996)   |                        |
|                |                          | <i>Clostridium botulinum</i>          | <i>Callinectes</i> spp.                                 | Lozano (1974)  |                        |
|                |                          | <i>Clostridium perfringes</i>         | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996)   |                        |
|                |                          | <i>Enterobacter aerogenes</i>         | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996)   |                        |
|                |                          | <i>Flavobacterium odoratum</i>        | <i>L. vannamei</i>                                      | Páez y Pimienta (1997)   |                        |
|                |                          | <i>Flavobacterium</i> sp.             | <i>L. vannamei</i>                                      | Astudillo y Muñoz (1993), Newmark y Vallejo (1995)                 |                        |
|                |                          | <i>Leucothrix</i> sp.                 | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995)   |                        |
|                |                          | <i>Moraxella</i> sp.                  | <i>L. vannamei</i>                                      | Astudillo y Muñoz (1993)   |                        |
|                |                          | <i>Mycobacterium</i> sp.              | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995)   |                        |
|                |                          | <i>Pseudomonas aeruginosa</i>         | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996)   |                        |
|                |                          | <i>Pseudomonas fluorescens</i>        | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996)   |                        |
|                |                          | <i>Pseudomonas</i> sp.                | <i>L. vannamei</i>                                      | Astudillo y Muñoz (1993)   |                        |
|                |                          | <i>Salmonella thypi</i>               | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996)   |                        |
|                |                          | <i>Staphylococcus</i> sp.             | <i>L. vannamei</i>                                      | Vallejo (1996)   |                        |
|                |                          | <i>Spirillum</i> sp.                  | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995)   |                        |
|                |                          | <i>Thiothrix</i> sp.                  | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995)   |                        |
|                | <i>Rickettsia</i> sp.    | <i>L. vannamei</i>                    | Newmark y Vallejo (1995)                                |  |                        |
|                | <i>Spiroplasma citri</i> | <i>L. vannamei</i>                    | Nunan <i>et al.</i> (2004)                              |  |                        |
| <b>Hongos</b>  |                          | <i>Fusarium</i> spp.                  | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995), Wedler (1998)                            |                        |
|                |                          | <i>Lagenidium</i> spp.                | <i>L. vannamei</i>                                      | Newmark y Vallejo (1995)   |                        |

Continuación Tabla 2.

| Phylum / Clase               | Orden / Familia | Parásito                          | Huésped   | Autor (es)  |
|------------------------------|-----------------|-----------------------------------|---|---|
| <b>Protozoarios</b>          |                 | <i>Epistylis</i> sp.              | <i>L. vannamei</i>  | Newmark y Vallejo (1995)                                    |
|                              | Gregarinas      | <i>Nenatopsis litopenaeus</i>     | <i>L. vannamei</i>  | Saavedra (1995)   |
|                              |                 | <i>N. sinaloensis</i>             | <i>L. vannamei</i>  | Saavedra (1995)   |
|                              |                 | <i>N. vannamei</i>                | <i>L. vannamei</i>  | Saavedra (1995)   |
|                              |                 | <i>Vorticella</i> sp.             | <i>L. vannamei</i>  | Newmark y Vallejo (1995)                                    |
|                              |                 | <i>Zoothamium</i> sp.             | <i>L. vannamei</i>  | Newmark y Vallejo (1995)                                    |
| <b>Artropoda / Crustacea</b> |                 |                                   |   |   |
| Isopoda                      | Aegidae         | <i>Rocinela signata</i>           | <i>Dasyatis americana</i> ,<br><i>D. guttata</i>  | Williams <i>et al.</i> (1994)                               |
|                              | Bopyridae       | <i>Probopyrus pandalicola</i>     | <i>Leander tenuicornis</i> ,<br><i>Paraclimenes iridescens</i>  | Álvarez <i>et al.</i> (1999)                                |
|                              | Corallanidae    | <i>Alcirona krebsii</i>           | <i>Apogon binotatus</i> ,<br><i>Scorpaena bergi</i>   | Bunkley <i>et al.</i> (1999)                                |
|                              |                 | <i>Excorallana costata</i>        | <i>Mycteroperca bonaci</i>  | Bunkley <i>et al.</i> (1999)                                |
|                              |                 | <i>Excorallana tricornis</i>      | <i>Anisotremus virginicus</i> ,<br><i>Dasyatis americana</i> , <i>D. guttata</i> ,<br><i>Prionotus ophryas</i> , <i>Selene vomer</i> ,<br><i>Scorpaena plumieri</i>                             | Williams <i>et al.</i> (1994)                               |
|                              |                 | <i>Tridentella virginata</i>      | <i>Mycteroperca bonaci</i>  | Bunkley <i>et al.</i> (1999)                                |
|                              | Cymothoidae     | <i>Anilocra abudefdufi</i>        | <i>Abudefduf saxatilis</i>  | Williams y Williams (1981)                                  |
|                              |                 | <i>Anilocra haemuli</i>           | <i>Mycteroperca bonaci</i> , <i>M. rubra</i> ,<br><i>Paranthias furcifer</i>  | Williams y Williams (1981), Bunkley <i>et al.</i> (1999)    |
|                              |                 | <i>Cymothoa exigua</i>            | <i>Parapsettus panamensis</i>   | Ramos-Tafur <i>et al.</i> (1994),                           |
|                              |                 | <i>Cymothoa excisa</i>            | <i>Diapterus auratus</i> , <i>D. rhombeus</i> ,<br><i>Lutjanus analis</i> , <i>L. synagris</i> ,<br><i>Micropogonias furnieri</i> ,<br><i>Stellifer venezuelae</i> ,<br><i>Ocyurus crysurus</i> | Williams <i>et al.</i> (1994), Bunkley <i>et al.</i> (1999) |
|                              |                 | <i>Cymothoa oestrum</i>           | <i>Caranx latus</i> ,<br><i>Chloroscombrus crysurus</i> ,<br><i>Elagatis bipinnulata</i>  | Bunkley <i>et al.</i> (1999)                                |
|                              |                 | <i>Livoneca redmani</i>           | <i>Scomberomorus brasiliensis</i>   | Bunkley <i>et al.</i> (1999)                                |
|                              |                 | <i>Livoneca</i> sp.               | <i>Haemulon bonariense</i>  | Bunkley <i>et al.</i> (1999)                                |
|                              | Gnathiidae      | <i>Gnathia</i> sp.                | <i>Apogon quadrisquamatus</i> ,<br><i>Epinephelus niveatus</i> ,<br><i>Scorpaenidae</i><br><i>tredecimspinosus</i>  | Bunkley <i>et al.</i> (1999)                                |
|                              | Tridentallidae  | <i>Tridentella virginiaa</i>      | <i>Mycteroperca bonaci</i>  | Bunkley <i>et al.</i> (1999)                                |
| Copepoda                     | Argulidae       | <i>Argulus</i> sp.                | <i>Mugil incilis</i>  | Vásquez (1974), Conroy y Vásquez (1975), Vélez (1978)       |
|                              | Bomolochidae    | <i>Holobomolochus nudiusculus</i> | <i>Scomberomorus brasiliensis</i><br><i>S. sierra</i>   | Galeano y Romero (1981)                                     |
|                              | Caligidae       | <i>Caligulus omissus</i>          | <i>Scomberomorus sierra</i>   | Galeano y Romero (1981)                                     |
|                              |                 | <i>Caligulus coryphaena</i>       | <i>Acanthocybium Euthynnus</i> ,<br><i>E. alletteratus</i><br><i>Sarda</i> , <i>Scomberomorus</i> ,<br><i>Thunnus</i> ,   | Cressey <i>et al.</i> (1983), Bunkley <i>et al.</i> (1999)  |

Continuación Tabla 2.

| Phylum / Clase | Orden / Familia   | Parásito                          | Huésped  | Autor (es)   |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|--|--|
|                |                   | <i>Caligulus mutabilis</i>        | <i>Acanthocybium Euthynnus, Sarda, Scomberomorus, Thunnus</i>  | Cressey y Cressey (1980), Cressey et al. (1983)                      |
|                |                   | <i>Caligulus pelamydis</i>        | <i>Acanthocybium Euthynnus, Sarda, Scomberomorus, Thunnus</i>  | Cressey y Cressey (1980), Cressey et al. (1983)                      |
|                |                   | <i>Caligulus productus</i>        | <i>Acanthocybium, Euthynnus, Sarda, Scomberomorus, Thunnus</i> | Cressey y Cressey (1980), Cressey et al. (1983)                      |
|                |                   | <i>Euryphorus nordmanni</i>       | <i>Coryphaena hippurus</i>                                     | Bunkley et al. (1999)  |
|                |                   | <i>Leptophtherius curtus</i>      | <i>Mycteroperca bonaci</i>                                     | Bunkley et al. (1999)  |
|                |                   | <i>Lepophtheirus dissimulatus</i> | <i>Mycteroperca bonaci</i>                                     | Bunkley et al. (1999)  |
|                |                   | <i>Midias lobotes</i>             | <i>Sphyraena barracuda</i>                                     | Victoria (1987)  |
|                | Ergasilidae       | <i>Ergasilus sieboldi</i>         | <i>Eugerres plumieri</i>                                       | Paz (2000)   |
|                | Lernaeolopidoidea | <i>Lernaeolopus striatus</i>      | <i>Caranx hippos</i>   | Álvarez-León y Overstreet (2003)                                     |
|                | Penellidae        | <i>Cardiodectes rubosus</i>       | <i>Harengula clupeola</i>                                      | Williams et al. (1994)   |
|                |                   | <i>Collipravirus parvus</i>       | <i>Jenkinsia lamprotaenia</i>                                  | Williams et al. (1994)   |
| Cirripedia     |                   | <i>Balanus</i> sp.                | <i>Callinectes arcuatus, C. toxotes</i>                        | Estéves (1972), Norse y Estéves (1977)                               |
|                |                   | <i>Chelonibia</i> sp.             | <i>C. arcuatus, C. toxotes, Euphyllax robustus</i>             | Estéves (1972), Norse y Estéves (1977)                               |
|                |                   | <i>Loxothylacus texanus</i>       | <i>C. sapidus, Goniopsis cruentata</i>                         | Young y Campos (1988), Alvarez y Blain (1993), Alvarez et al. (2003) |
|                |                   | <i>Myzobdella</i> sp.             | <i>C. arcuatus, C. toxotes</i>                                 | Estéves (1972), Norse y Estéves (1977)                               |
|                |                   | <i>Octolasmis</i> sp.             | <i>C. arcuatus, E. robustus</i>                                | Estéves (1972), Norse y Estéves (1977), Madrid et al. (1992)         |
|                |                   | <i>Octolasmis lowei</i>           | <i>C. sapidus</i>  | Young y Campos (1988)  |

Aunque la relación simbiótica o parasitaria en crustáceos, al parecer se puede iniciar en etapas muy tempranas del huésped y el hospedero, no hay aparentemente un efecto negativo (patología o enfermedad) en los crustáceos afectados (Álvarez-León, 1981). No obstante, cuando el número de hospederos es tal que impide realizar al crustáceo sus funciones vitales, por ejemplo cuando se sitúan en la cavidad branquial, bucal o en los ojos, reducen las capacidades propias y competitivas frente a sus congéneres sanos.

Vale la pena aclarar que con muy pocas excepciones, no se ha estudiado si las especies introducidas de crustáceos son el hospedero natural o el hospedero infectado casualmente. En todo caso es alto el porcentaje de parásitos que se han detectado tanto en las especies nativas y como en las exóticas cuando están en policultivo, lo cual permite especular que pueden darse varios casos de intercambio de parásitos.

Los problemas sanitarios que afectan a los crustáceos en Colombia se incluyen en tres categorías: (1) calidad de aguas, (2) manejo de la nutrición y (3) infecciones de origen bacteriano o parasitario. Las dos primeras dependen de las acciones y decisiones humanas, por lo que pueden ser prevención y manejo; la tercera depende del adecuado o errado manejo que se dé a las dos primeras (Iregui-Castro et al., 2004b).

Los grupos etiológicos son de tipo físico (temperatura), químicos (pH, oxígeno, nitritos, nitratos, amonio, es decir los relacionados con el agua), contaminantes (temperatura, pesticidas, herbicidas, colorantes, fijadores, también relacionados con el agua), biológicos (virus, bacterias, hongos, protozoos, gusanos, crustáceos y peces), nutricionales (defecto o exceso), y genéticos (Iregui-Castro et al., 2001a).

**Tabla 3.** Enfermedades más comunes causadas por los parásitos que afectan los crustáceos de aguas dulces, estuarinas y marinas de Colombia, entre 1995 y 2003

| Causada por                      | Parásito  | Enfermedad  | Autor (es)   |
|----------------------------------|---|---|--|
| <b>Virus, Bacterias</b>          | <i>Vibrio fluvialtilis</i> , <i>V. harveyi</i> , <i>V. parahaemolyticus</i> , <i>V. vulnificus</i>  | Vibriosis (letargia, debilidad, nado desorientado, opacidad del abdomen, textura blanda, expansión de los cromatóforos melanización de urópodos, pleópodos y periópodos, fluorescencia en los urópodos)   | González (1997), Páez y Pimienta (1997)                            |
|                                  | <i>Aeromonas hydrophila</i> , <i>Vibrio alginolyticus</i> , <i>V. damsella</i> , <i>V. fluvialtilis</i> , <i>V. parahaemolyticus</i> , <i>V. vulnificus</i> | Septicemia bacteriana (opacidad en la musculatura abdominal. Flexión dorsal del abdomen, letargia, enrojecimiento de los pereiópodos y pleópodos, melanización de los filamentos branquiales, a veces lesiones cuticulares en los extremos ventrales del caparazón) | Páez y Pimienta (1997)   |
|                                  | <i>Vibrio fluvialtilis</i> , <i>V. harveyi</i> , <i>V. Parahaemolyticus</i> , <i>V. vulnificus</i>  | Síndrome de Gaviotas o vibriosis  | Páez y Pimienta (1997)   |
|                                  | <i>Vibrio</i> spp.  | Erosión bacteriana del caparazón (manchas marrones en áreas erosionadas por bacterias quitolíticas)   | Páez y Pimienta (1997), Wedler (1998)                              |
| <b>Carencias nutricionales</b>   |   | Deficiencia del ácido ascórbico, muerte negra   | Newmark y Vallejo (1995)   |
|                                  |   | Ablandamiento crónico del caparazón   | Newmark y Vallejo (1995)   |
|                                  |   | Enfermedad azul, coloración pálida  | Newmark y Vallejo (1995)   |
| <b>Agentes tóxicos</b>           |   | Cianofíceas tóxicas   | Newmark y Vallejo (1995)   |
|                                  |   | Enfermedad roja   | Newmark y Vallejo (1995)   |
|                                  |   | Ennegrecimiento de las branquias  | Newmark y Vallejo (1995)   |
|                                  |   | Aflatoxicosis   | Newmark y Vallejo (1995)   |
| <b>Tensores físicos extremos</b> |   | Burbujas de gas   | Newmark y Vallejo (1995)   |
|                                  |   | Necrosis muscular   | Newmark y Vallejo (1995)   |
| <b>Virus</b>                     | <i>Parvovirus</i> sp.   | IHHNV (Virus de la necrosis infecciosa hipodermal y hematopoyética), DNA de cadena simple   | Newmark y Vallejo (1995), Vallejo (1996), Vallejo y Newmark (1997) |
|                                  | <i>Parvovirus</i> sp.   | HPV ( <i>Parvovirus</i> hepatopancreático), DNA de cadena simple  | Newmark y Vallejo (1995), Aranguren et al. (2003)                  |
|                                  | <i>Baculovirus penaei</i>   | BP ( <i>Baculovirus penaei</i> ), DNA de cadena doble, ocluido  | Newmark y Vallejo (1995), Vallejo (1996), Vallejo y Newmark (1997) |
|                                  | <i>Baculovirus</i> sp.  | MBV ( <i>Baculovirus</i> tipo <i>monodon</i> ), DNA de cadena doble, ocluido  | Newmark y Vallejo (1995)   |
|                                  | <i>Baculovirus</i> sp.  | YHV (Virus del síndrome de la cabeza amarilla)  | Newmark y Vallejo (1995), Aranguren et al. (2003)                  |
|                                  | <i>Reovirus</i> spp   | REO-3 ( <i>Reovirus</i> tipo 3), DNA de cadena doble  | Newmark y Vallejo (1995)   |
|                                  | <i>Tagavirus</i> spp.   | LOVV (Virus de la vacuolización del órgano linfoide)  | Newmark y Vallejo (1995), Vallejo (1996), Vallejo y Newmark (1997) |
|                                  | -   | TSV (Virus del taura) causado por un virus de RNA de la familia Picornaviridae  | Vallejo (1996), Vallejo y Newmark (1997), Aranguren et al. (2003)  |
|                                  | -   | WSSV (Virus de la mancha blanca)  | Vidal et al. (2001), Aranguren et al. (2003)                       |
|                                  | -   | NHP (Hepatopancreatitis necrotizante)   | Aranguren et al. (2003), Briñez et al. (2003)                      |

Continuación Tabla 3.

| Causada por                                      | Parásito   | Enfermedad  | Autor (es)                                       |
|--|--|---|--|
| <b>Bacterias,<br/>Rickettsias,<br/>Clamidyas</b> | -  | SGS (Síndrome de gaviotas o sea gull síndrome), en los sistemas de engorde  | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | <i>Vibrio</i> sp., <i>Aeromonas</i> sp.  | Erosión bacteriana del caparazón, manchas cafés o negras.   | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | <i>Leucothrix</i> sp., <i>Thiothrix</i> sp.  | Fouling de bacterias epicomensales, filamentosis bacterial, bacterias en setas sobre branquias, apéndices, superficie corporal, mortalidad por hipoxia, en larvas y postlarvas.   | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | <i>Mycobacterium</i> sp.   | Pigmentación oscura en diferentes partes del cuerpo.  | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | <i>Spiroplasma citri</i>   | Spiroplasmosis patogénica   | Nunan <i>et al.</i> (2004)                       |
|  | <i>Vibrio anguillarum</i> , <i>V. Parahaemolyticus</i>   | Branquias rojas, branquias de color rojo claro a rojo oscuro, anorexia de juveniles y adultos.  | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | -  | Puntos negros, cola rota, erosión del exoesqueleto, necrosis de la cola, inicialmente de los bordes.  | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | <i>Vibrio alginolyticus</i> , <i>V. parahaemolyticus</i> , <i>Aeromonas</i> sp., <i>Spirillum</i> sp., <i>Flavobacterium</i> sp. | Enfermedad del caparazón, erosión del exoesqueleto de juveniles y adultos.  | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | -  | Hepatopáncreas necrótico.   | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | <i>Vibrio</i> sp.  | Bacterias luminicentes, en zoeas, larvas, postlarvas.   | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | <i>Rickettsia</i> sp.  | (TNHPS) Síndrome de hepatopancreatitis necrosante texas.  | Newmark y Vallejo (1995)                         |
| <b>Hongos</b>                                    | <i>Lagenidium</i> spp.   | Micosis, inactividad de organismos afectados, hifas visibles en apéndices llegando a cubrir todo el cuerpo.   | Newmark y Vallejo (1995), Wedler (1998)          |
|  | <i>Fusarium</i> spp.   | Fusariosis, ennegrecimiento de branquias con presencia de hifas, lesiones focales iniciales por daño de tejidos que se comienzan a melanizar. Los agentes son patógenos oportunistas que se encuentran naturalmente en el suelo y en los detritos, afectando animales enfermos o estresados.  | Newmark y Vallejo (1995)                         |
| <b>Protozoarios</b>                              | <i>Cephalobus</i> sp., <i>Nematopsis</i> spp.  | Gregarinas (Phylum Apicomplexa), presentes en larvas, juveniles y adultos, interfieren en los procesos gástricos; difíciles de diagnosticar, aunque un color amarillo sobre el estómago y la reducción en las tasas de crecimiento, conversión y mortandad son indicios útiles. Trofozoitos de gregarinas   | Newmark y Vallejo (1995)                         |
|  | <i>Epistylis</i> sp., <i>Vorticella</i> sp., <i>Zoothamnium</i> sp.  | Protozoarios epicomensales, presentes en larvas, juveniles y adultos, dificultan la respiración y la locomoción, pérdida del apetito y finalmente la muerte.  | Newmark y Vallejo (1995)                         |
| <b>Etiología desconocida</b>                     | -  | Síndrome de las bolitas. Pequeños pedazos enfermos con protuberancias de epitelio levantado en el intestino. Se inicia en los estados de zoea 1 y zoea 2 con la formación de bolitas blancas a ambos lados del abdomen las cuales cuando la enfermedad progresa se tornan negras y se localizan en el hepatopáncreas, intestino medio y estómago, ocasionando mortandades hasta del 90% | Newmark y Vallejo (1995), Páez y Pimienta (1997) |
| <b>Helmintos</b>                                 | <i>Paragonimus</i> sp.   | Paragonimosis en el ser humano.   | Quijada <i>et al.</i> (2005)                     |

**Tabla 4.** Asociaciones entre crustáceos limpiadores de parásitos y peces coralinos en el Caribe colombiano, entre 1977 y 1979.

| Familia      | Crustáceo Limpiador           | Peces Beneficiados   | Autor (es)   |
|--------------|-------------------------------|--|--|
| Hyppolytidae | <i>Lysmata grabhami</i>       | <i>Acanthurus bahianus</i> ,<br><i>A. chirurgus</i> , <i>Apogon affinis</i> , <i>A. binotatus</i> ,<br><i>Chaetodon capistratus</i> , <i>C. sedentarius</i> ,<br><i>Chromis cyanea</i> , <i>C. multilineata</i> , <i>Clepticus</i><br><i>parrai</i> , <i>Eupomacentrus variabilis</i> ,<br><i>Gymnothorax moringa</i> , <i>Holacanthus</i><br><i>ciliaris</i> , <i>H. tricolor</i> , <i>Lactrophys triquetus</i> ,<br><i>Muraena miliaris</i> , <i>Myripristis jacobus</i> ,<br><i>Pomacanthus paru</i> , <i>Prognathodes</i><br><i>aculeatus</i> , <i>Pseudopenaeus maculatus</i> | Corredor y Criales (1977),<br>Criales y Corredor (1977),<br>Criales (1979) |
| Palaemonidae | <i>Periclimenes pedersoni</i> | <i>Bothus ocellatus</i> , <i>Chaetodon sedentarius</i> ,<br><i>Chantigaster rostrata</i> , <i>Eupomacentrus</i><br><i>variabilis</i> , <i>Mulloidichthys martinicus</i> ,<br><i>Mycteroperca</i> sp., <i>M. tigris</i> , <i>Myripristis</i><br><i>jacobus</i> , <i>Prognathodes aculeatus</i> ,<br><i>Pseudopenaeus maculatus</i> , <i>Rypticus</i><br><i>saponaceus</i> , <i>Serranus</i> sp., <i>S. tigrinus</i> ,<br><i>Synodus intermedius</i>   | Corredor y Criales (1977),<br>Criales y Corredor (1977),<br>Criales (1979) |

**Tabla 5.** Asociaciones entre crustáceos y otros invertebrados en el Caribe y Pacífico colombiano, entre 1977 y 1995.

| Familia                  | Crustáceos  | Invertebrados y Peces   | Autor (es)                          |
|--------------------------|---|---|-------------------------------------|
| Palaemonidae             | <i>Neopontonides</i><br><i>henryonprahli</i>              | <i>Lophogorgia alba</i> ,<br><i>Muricea robusta</i><br>(Gorgónidos)   | Ramos (1977)                        |
| Porcellanidae            | <i>Clastocheus vanderhorsti</i>                           | <i>Acyrtus rubiginosus</i> (Pisces),<br><i>Ophiotrix</i> sp., <i>Echinometra lucunter</i><br>(Equinodermos) | Shoppe (1995)                       |
| Paguridae, Porcellanidae | <i>Dardanus foccusus</i> ,<br><i>Porcellanidae sayana</i> | <i>Callictis tricolor</i> (Cnidaria)  | López-Victoria <i>et al.</i> (2004) |

La percepción integral del fenómeno enfermedad, incluye por lo menos siete aspectos fundamentales: (1) la enfermedad en animales acuáticos cultivados casi nunca es un problema individual, por lo general es un asunto de población, que puede estar estratificado por edades; (2) no existe una sola causa, a lo sumo la enfermedad es de origen multicausal; (3) el diagnóstico no puede seguir siendo unicausal, debe ser integral, o sea que se incluyan procedimientos que abarquen la totalidad de los factores que intervienen en todo el sistema de producción (mapa epidemiológico de la región, clima, manejo de la granja, aguas y uso adecuado, laboratorios y uso adecuado); (4) enfermedad no es sólo el brote y mortalidad grave durante dicho brote, el concepto de enfermedad debe ser una preocupación permanente en aprovechamientos tal como lo es la rentabilidad; (5) debe existir un monitoreo permanente del país y de las granjas, en esencia debe haber un cambio de actitud hacia el tiempo en que percibimos las enfermedades; (6) la enfermedad puede ser un asunto de

granja, de región y de nación y algunas veces de tipo multinacional, por lo que debe haber un cambio de actitud hacia el espacio en que concebimos las enfermedades, y (7) la enfermedad casi nunca es un problema personal, es de tipo comunitario por lo cual incluye: productores, granjas, agremiaciones, productores de insumos, importadores y exportadores, laboratorios privados, instituciones del Estado, universidades, por tanto la enfermedad es un asunto nacional, no exclusivamente personal ni estatal (Iregui-Castro *et al.*, 2004a, 2004b).

Aunque existen bacterias asociadas a los camarones que pueden provocar infecciones en personas que habitualmente manipulan o consumen estos productos. Las infecciones pueden ser causadas tanto por bacterias que provocan enfermedades al propio camarón, como aquellas que se presentan en forma incidental en el ambiente estuarino o marino del cual se extraen. Al igual que las infecciones de origen terrestre, la mayor parte está provocada por especies de los géneros

*Aeromonas (A. hydrophila), Erysipelothrix (E. rhusiopathiae), Mycobacterium (M. chelonai, M. fortuitum, M. marinum, M. shottsii), Staphylococcus, Streptococcus y Vibrio (V. parahaemolyticus, V. vulnificus)*. En general las enfermedades causadas son moderadas y benignas, pero en aquellas personas susceptibles o que padecen enfermedades hepáticas, diabetes, alcoholismo y deficiencias inmunitarias, el consumo de crustáceos infectados, puede ocasionarles enfermedades que pueden ser graves (**Holliman, 2006**).

### Agradecimientos

La presente contribución fue especialmente preparada para la realización del Curso de Evaluación de Impactos de la Camaronicultura, realizado por la Universidad de La Sabana a través de su Facultad de Ingeniería, celebrado en Chía (Cundinamarca) Colombia entre el 3 y el 7 de julio de 2003 y actualizado para el Taller de Patología: Signos y Diagnóstico de las Patologías más Frecuentes en el Camarón Blanco *Litopenaeus vannamei*, organizado por el Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma II – Acuicultura Red Vannamei, entre la Cooperación Iberoamericana y la República de Panamá, celebrado en Aguadulce (Coclé) Panamá, entre el 24 y el 28 de 2005. Se agradecen todos los comentarios y sugerencias de los colegas y especialistas en carcinopatología que han tenido la oportunidad de sugerir modificaciones en beneficio de la versión final de este aporte.

### Referencias

- Alonso, J. A., J. A. Suárez-Navarrete & J. C. Tamayo.** 1990. Tratamiento químico con bacitrin (trimetropinsulfato) de *Vibrio alginolitycus* en padrotes de *Penaeus vannamei* Boone 1931. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 66 p.
- Alvarado-Forero, H. & F. de P. Gutiérrez-Bonilla.** 2002. Especies hidrobiológicas continentales introducidas y transplantadas y su distribución en Colombia. MinAmbiente / RAMSAR / CVC. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia), 180 p.
- Álvarez-León, R.** 1981. El isópodo *Nerocilia californica* simbionte de *Cyathichthys gilberti* (Bothidae) en el sistema lagunar de Huizache - Caimanero, noroeste de México. UCR-Rev. Biol. Trop., 29 (1): 39-44.
- Álvarez-León, R.** 1982. Antecedentes y posibilidades para el desarrollo de la maricultura en Colombia. Rev. Lat.-Amer. Acuicul., 13: 9-19.
- Álvarez-León, R.** 1989. Segundo registro del género *Domecia* Eydoux & Souleyet (Crustacea: Decapoda: Xanthidae) en las costas colombianas del Caribe. Rev. Biol. Trop., 37 (1): 113.
- Álvarez-León, R.** 1993. Primer registro de *Probopyrus pandalicola* (Packard, 1879) (Isopoda: Epicaridea: Bophridae) en el Caribe colombiano. UCR-Rev. Biol. Trop., 41 (2): 307-308.
- Álvarez-León, R.** 1999a. Conocimiento actual de la ictiología en Colombia y su diversidad: lista preliminar de las especies de peces factibles de incluir en el Libro Rojo de la Micota, la Flora y la Fauna. Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Programa Biología de la Conservación. Proy. para la Elaboración de una Lista Nacional de los Peces Amenazados. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia), 25 p. + 4 tablas + 3 anexos.
- Álvarez-León, R.** 1999b. Revisión de los registros sobre la asociación Cirripedia-Portunidae del Caribe y Pacífico colombiano. Mem. Soc. Cienc. Naturales La Salle, 59 (151): 25-28.
- Álvarez-León, R.** 2000. New records of association among crustaceans and echinoderms in the Colombian Caribbean coast. Brenesia, 53: 63-66.
- Álvarez-León, R.** 2004. *Domecia acanthophora acanthophora* (Schramm, 1867) (Crustacea, Decapoda, Xanthidae) en el Caribe colombiano. UFC-Arquivos de Ciências do Mar, 38: 113-118.
- Álvarez-León, R. & L. Blain-Garzón.** 1993. Registro de *Loxothylacus* (Crustacea Cirripedia: Sacculidae) en el suroeste del Caribe colombiano. UDA-Rev. Actualidades Biológicas, 19 (67): 39.
- Álvarez-León, R. & R. García-Pérez.** 1993. Hallazgo de *Bursatella blainvillei* 1817 (Mollusca: Opisthobranchia: Notarchidae) en camaronas vecinas a la Bahía de Barbacoas, Colombia. UDA-Rev. Actualidades Biológicas, 19 (67): 40.
- Álvarez-León, R. & A. Rodríguez-Forero.** 2000. La acuicultura en Colombia: estado actual y perspectivas. Rev. INFOPECA Internacional, 6: 40-47.
- Álvarez-León, R. & R. M. Overstreet.** 2003. First report of *Caranx hippos* (Pisces, Carangidae), as host of *Lernaeolopus striatus* (Copepoda, Lernaeolopidae), in the Colombian Caribbean coast. UCR-Rev. Biol. Trop., 51 (1): 275.
- Álvarez-León, R., J. E. Álvarez-Barrera & S. Sepúlveda-Cárdenas.** 1999. *Probopyrus pandalicola* (Packard, 1879) (Isopoda: Epicaridea: Bophridae) en el Caribe colombiano. Mem. Soc. Cienc. Naturales La Salle, 59 (151): 17-23.
- Álvarez-León, R., F. de P. Gutiérrez-Bonilla & A. Rodríguez-Forero.** 2002. La introducción y trasplante de peces dulceacuícolas en Colombia: impactos ecológicos, económicos y legales, pp. 55-62 + 270-274 In: Mojica-Corso, J. I., C. Castellanos-Castillo, J. S. Usma-Oviedo & R. Álvarez-León (eds.) El libro rojo de los peces dulceacuícolas de Colombia. La Serie de Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. ICN-UNC / IIBAVH / MINAMBIENTE / CI-Colombia. Santa Fe de Bogotá D. C. (Colombia), 2002, 285 p.
- Álvarez-León, R., R. M. Overstreet, S. Sepúlveda-Cárdenas & J. E. Álvarez-Barrera.** 2003. First report of the association *Loxothylacus texanus* (Cirripedia: Sacculinidae) - *Goniopsis cruentata* (Crustacea: Grapsidae) in the Colombian Caribbean. UDC-Rev. Biol. Trop., 51 (1): 265.
- Anónimo.** 1994. Virus del Taura (TCV) en Ecuador. Guayaquil (Ecuador), 7 p.
- Anónimo.** 1996. Estudio de caso: Síndrome del Taura. Guayaquil (Ecuador), 10 p.

- Aranguren-Caro, L. F.** 1997. Identificación de *Vibrio* spp en la hemolinfa de *Penaeus vannamei* y su relación con signos externos anormales. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Aranguren-Caro, L. F., B. Briñez, P. Bernardi, L. Aragón & X. Caraballo.** 2003. Los camarones de cultivo y sus enfermedades. COLCIENCIAS-Rev. Colombia, Ciencia y Tecnología, 21 (3): 48-55.
- Aranguren-Caro, L. F., B. Briñez, L. Aragón, C. Platz, X. Caraballo, A. Suárez & M. Salazar.** 2006. Necrotizing hepatopancreatitis (NHP) infected *Penaeus vannamei* female broodstock: Effect on reproductive parameters, nauplii and larvae quality. Aquaculture, 258 (1): 337-343.
- Astudillo-Sevillano, S. & L. H. Muñoz-Arroyabe.** 1993. Observaciones generales y registros de la flora bacteriana en los tanques de cría larvatoria del camarón *Penaeus vannamei* Boone 1931 (Julio-Agosto 1991). Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Azcona, M. del P.** 1983. Estudio preliminar del ciclo de vida de una especie de camarón de agua dulce (Familia Palaemonidae, Género *Macrobrachium*) presentes en la región de Urabá. Tesis Profesional. Fac. de Ciencias, Pontificia Univ. Javeriana, 76 p.
- Barragán-Becerra, L.** 2001. Evaluación de los mecanismos de defensa del camarón blanco *Penaeus vannamei* (Boone, 1931), por medio de la administración de inmunostimulantes frente a la infección experimental con la bacteria *Vibrio parahaemolyticus*. Tesis Profesional. Fac. Microbiol. Industria. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 88 p.
- Borrero-Herrera, C. I.** 1983. Aporte al conocimiento de la morfología externa de las especies de camarón de agua dulce (Familia Palaemonidae, Género *Macrobrachium*) presentes en la región de Urabá. Tesis Profesional. Fac. de Ciencias, Pontificia Univ. Javeriana, 193 p.
- Briñez, B., L. F. Aranguren-Caro & M. Salazar.** 2003a. Fecal samples as DNA source for the diagnosis of necrotizing hepatopancreatitis (NHP) in *Penaeus vannamei* broodstock. Diseases of Aquatic Organisms, 55: 69-72.
- Briñez, B., C. A. Suárez, O. M. Vidal & C. B. Granja.** 2003b. DNA from dead shrimp tissues is suitable for white spot syndrome virus (WSSV) detection by the polymerase chain reaction. World Aquacul. Magazine, 34 (1).
- Brock, J. A.** 1995. Memorias del curso especializado de entrenamiento en el manejo y diagnóstico de enfermedades del camarón de cultivo. ACUANAL / CENIACUA. Santa Fe de Bogotá D. C. Colombia, 136 p.
- Brock, J. A.** 1996. Análisis de los resultados de histopatología y microbiología, realizados por CENIACUA en muestreos de las costas colombianas. ACUANAL / CENIACUA. Santa Fe de Bogotá D. C. Colombia.
- Bunkley-Williams, L. B. & E. H. Williams.** 1981. Nine new species of *Anilocra* (Crustacea: Isopoda: Cymothoidae) external parasites of West Indian coral reef fishes. Proc. Biol. Soc. Wash., 94 (4): 1005-1047.
- Bunkley-Williams, L. B., E. H. Williams & J. Garzón-Ferreira.** 1999. Some isopods and copepod parasites Crustacea of Colombian marine fishes. Carib. J. Sci., 35 (3-4): 311-314.
- Campos-Campos, N. H. & R. Lemaitre-Vélez.** 2001. Estado actual del conocimiento de los crustáceos decápodos de la costa Caribe colombiana: recientes avances y descubrimientos, pp. 106 In: Mem. Resúmenes IX Congr. Latin.-Amer. sobre Ciencias del Mar, ALICMAR / UNC-IEC-FDC / COLCIENCIAS / CORALINA / INVEMAR / SENA-SAP / CIOH / ICFES / IDEAM / MMA. San Andrés Isla (SAP.) Colombia, sep. 16-20.
- Campos-Campos, N. H., R. Lemaitre-Vélez & G. R. Navas-Suárez.** 2003. La fauna de crustáceos decápodos de la costa Caribe colombiana: un aporte al conocimiento de la biodiversidad en Colombia, pp. 174-184. En: Castillo, N. C. & D. N. Alvis-Palma (eds.) El Mundo Marino en Colombia: Investigación y Desarrollo de Territorios Olvidados. UNC- Red de Estudios del Mundo Marino. Bogotá D. C. (Colombia).
- Camacho, L. & M. Chinchilla.** 1989. Clave taxonómica de ciliados epibiontes de Decapoda (Natantia). Rev. Biol. Trop., 37 (1): 15-22.
- Castillo-Rojas, L.** 1999. Evaluación del efecto de la inclusión de cuatro inmunostimulantes en la premezcla vitamínica en juveniles camarón blanco infectados. Tesis Profesional. Fac. Biol. Mar., Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Conroy, D. A. & C. Vásquez-Díaz.** 1975a. Informe sobre el trabajo del Proyecto (Col / 552), en el campo de la ictiopatología durante el año de 1974. Proy. INDERENA / FAO para el Desarrollo de la Pesca Continental en Colombia. Bogotá D. E. Doc. Fi: DP / COL / 71 / 552 / Ser. Publicación, 10: 1-47.
- Corredor-Arias, L. & M. M. Criales-Gutiérrez.** 1977. Aspectos etológicos y ecológicos de camarones limpiadores de peces (Palaemonidae, Hippolitidae y Stenopodidae). Tesis Profesional. Fac. Biol. Mar., Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 139 p.
- Cressey, R. F. & H. B. Cressey.** 1980. Parasitic copepods of mackerel and tuna-like fishes (Scombridae) of the world. Smith. Contrib. Zool., 311: 1-186.
- Cressey, R. F., B. B. Collette & J. L. Russo.** 1983. Copepods and scumbrid fishes: a study in host-parasite relationships Fishery Bull., 81 (2): 227-265.
- Criales-Gutiérrez, M. M.** 1979. Ecología y etología de los camarones limpiadores de peces, *Periclimenes pedersoni* Chace y *Lysmata grabhami* (Gordon) en la Bahía de Santa Marta (Colombia). Acta Cientif. Venezolana, 30: 570-576.
- Criales-Gutiérrez, M. M. & L. Corredor-Arias.** 1977. Aspectos etológicos y ecológicos de camarones limpiadores de peces (Natantia: Palaemonidae, Hippolytidae, Stenopodidae). An. Inst. Invest. Mar. Punta de Betín, 9: 141-156.
- Escobar, J. G.** 1979. Carídeos (Palaemonidae y Atyidae) en los ríos de la región de Santa Marta. An. Inst. Invest. Mar. Punta de Betín, 11: 93-134.
- Estévez-Rueda, M.** 1972. Informe preliminar sobre la biología de las especies alopátricas de cangrejos del Pacífico (Brachyura, Portunidae). Tesis Profesional. Fac. de Biol. Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 42 p.
- Ferix-Campo, I.** 1972. Contenido estomacal del camarón *Penaeus vannamei* en estanques en la isla del Covado. Tesis Profesional. Fac. de Biol. Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

- Fernández, A. B., I. Ruíz, C. Ortega, J. L. Muzquíz, I. De Blas, C. Iregui & P. R. Eslava-Mocha.** 1997. Principales factores de riesgo de las enfermedades infecciosas en la acuicultura de agua dulce. *ACOVEZ*, 22: 6-11.
- Galán-Mejía, A.** 1999. Efecto de cuatro inmunoestimulantes incluidos en la mezcla previtamínica suministrada a poslarvas de *Litopenaeus vannamei* infectadas de Taura. Tesis Profesional. Fac. Biol. Mar., Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Galeano, M. L. & M. Romero.** 1981. Contribución al conocimiento de parásitos de peces en la Ciénaga Grande de Santa, Colombia, II Parte. *UBJTL-Bol. Museo del Mar*, 10: 40-53.
- Gitterle-Santamaría, T.** 1999. Evaluación de la resistencia de diferentes poblaciones del camarón blanco marino al virus síndrome del Taura, en condiciones controladas. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Gitterle-Santamaría, T., M. Rye, R. Salte, J. Cock, H. Johansen, C. Lozano, J. A. Suárez & B. Gjerde.** 2005a. Genetic (co) variation in harvest weight and survival in *Penaeus (Litopenaeus) vannamei* under standard commercial conditions. *Aquaculture*, 243: 83-92.
- Gitterle-Santamaría, T., R. Salte, B. Gjerde, J. Cock, H. Johansen, M. Salazar, C. Lozano & M. Rye.** 2005b. Genetic (co) variation in resistance to White Spot Syndrome Virus (WSSV) and harvest weight in *Penaeus (Litopenaeus) vannamei*. *Aquaculture*, 246 (1): 139-149.
- Gitterle-Santamaría, T., J. Odegard, B. Gjerde, M. Rye & R. Salte.** 2006a. Genetic parameters and accuracy of selection for resistance to White Spot Syndrome Virus (WSSV) and harvest weight in *Penaeus (Litopenaeus) vannamei* using different statistical models. *Aquaculture*, 251 (2): 210-218.
- Gitterle-Santamaría, T., B. Gjerde, J. Cock, M. Salazar, M. Rye, O. M. Vidal, C. Lozano, C. Erazo & R. Salte.** 2006b. Optimization of experimental infection protocols for the estimation of genetic parameters of resistance to White Spot Syndrome Virus (WSSV) and harvest weight in *Penaeus (Litopenaeus) vannamei*. *Aquaculture*, 261 (2): 501-509.
- Gitterle-Santamaría, T., H. Johansen, C. Erazo, C. Lozano, J. Cock, M. Salazar & M. Rye.** 2007. Response to multi-trait selection for harvest weight, overall survival, and resistance to in White Spot Syndrome Virus (WSSV) in *Penaeus (Litopenaeus) vannamei*. *Aquaculture*, 272.
- González-Cendales, Y. T.** 1997. Efecto patogénico de *Vibrio fluvialis*, *Vibrio harvegi*, *Vibrio parahaemolyticus* y *Vibrio vulnificus* sobre camarones peneidos. Fac. de Ciencias. Depto. De Bacteriología. Pontificia Univ. Javeriana, 148 p.
- González-Solano, A. & J. Guerrero-Muñoz.** 1977. Estudio bioecológico del camarón de agua dulce (*Macrobrachium carcinus*) (Linnaeus, 1758) (Crustacea, Palaemonidae), en el "Arroyo de Matute" e intento de cultivo experimental bajo condiciones controladas. Dpto. Bolívar - Caribe colombiano. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 137 p.
- Garzón-Ferreira, J.** 1990. An isopod, *Rocinella signata* (Crustacea. Isopoda: Aegidae), that attacks humans. *Bull. Mar. Sci.*, 46 (3): 813-815.
- Granja, C. B., O. M. Vidal, G. Parra & M. Salazar.** 2006. Hyperthermia reduces viral load of white spot virus in *Penaeus vannamei*. *Diseases of Aquatic Organisms*, 68: 175-180.
- Granja, C. B., L. F. Aranguren-Caro, L. F. Vidal, L. Aragón & M. Salazar.** 2003. Does hyperthermia increase apoptosis in white spot virus (WSSV) infected *L. vannamei*?. *Diseases of Aquatic Organisms*, 54 (1): 73-78.
- Gautier, D.** 2002. The adoption of good management practices by the shrimp industry in Caribbean coast of Colombia. WB / NACA / WWF / FAO Consortium Program on Shrimp Farming and the Environment. Report. Consortium, 4.
- Gutiérrez-Bonilla, F. de P.** 2001. La introducción de especies como fenómeno global y las especies hidrobiológicas continentales introducidas y / o transplantadas en Colombia. *Asociación Luna Roja - Rev. Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 5 (14): 3-32.
- Guzmán-Cifuentes, G.** 1991. Flora bacteriana en la cría larvaria con y sin biofiltración de camarón blanco *Penaeus vannamei* Boone 1931. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Holliman, D.** 2006. Enfermedades cutáneas por manipular camarones. *Rev. INFOPESCA Internacional*, 25: 16-18.
- Laightner, D. V.** 1999. The penaeid shrimp viruses TSV, IHNV, WSSV, and YHV: Current status in the Americas available diagnostic methods, and management strategies. *J. Appl. Aquac.*, 9: 27-52.
- Lemaitre-Vélez, R. & R. Álvarez-León.** 1993. Crustáceos decápodos del Pacífico colombiano: Lista de especies y consideraciones zoogeográficas. *An. Inst. Mar. Punta de Betín*, 21: 33-76.
- Llanos-B, J. F. & G. Jaramillo-Montes.** 1979. Estudio experimental del desarrollo larval de *Macrobrachium carcinus* (Linnaeus, 1758) ante variaciones de la dieta alimenticia y su relación con algunos factores abióticos. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 63 p.
- López-Victoria, M., L. M. Barrios, H. Kraus & L. A. Osorio.** 2004. New aspects on the symbiotic relationships between *Dardanus focusus* (Crustacea: Paguridae), *Calliactis tricolor* (Cnidaria: Hormathiidae) and *Porcellana sayana* (Crustacea: Porcellanidae). *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 33: 261-264.
- Lozano-Díaz, H.** 1974. Métodos para el procesamiento de jaibas. *INDERENA-Rev. Divulgación Pesquera*, 1 (4): 1-7.
- Madrid, N., M. Pineda & F. Pineda-Polo.** 1992. Biología de la jaiba *Callinectes arcuatus* en el Pacífico colombiano.
- Martínez-Poinset, C. & A. P. Osorio-Pérez.** 1995. Reconocimiento de la presencia del *Baculovirus penaei* (Couch, 1974) y su incidencia en la morfología y crecimiento de *Penaeus vannamei* (Boone, 1931) en cultivos del Caribe colombiano. Tesis Profesional. Fac. Biología Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Martínez-Silva, L. E.** 1970. Contribución al conocimiento de la biología del langostino de agua dulce *Macrobrachium carcinus* (Linnaeus, 1758) (Crustacea, Palaemonidae) de la Ciénaga "El Totumo". Tesis Profesional. Fac. Biología Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

- Martínez-Silva, L. E.** 1974. Distribución biogeográfica de camarones de agua dulce del Género *Macrobrachium* Bate, 1968 (Crustacea, Palaemonidae) en el norte de Colombia. *INDERENA-Rev. Divulgación Pesquera*, 1(2): 1-168.
- Martínez-Silva, L. E.** 1975. Informe bibliográfico sobre camarones de agua dulce género *Macrobrachium* Bate, 1968 (Crustacea, Palaemonidae). *UBJTL-Inf. Museo del Mar*, 11: 1-10.
- Martínez-Silva, L. E.** 1975. Biología del camarón de agua dulce *Macrobrachium acanthurus* (Wiegmann, 1836) (Crustacea, Palaemonidae), en la Ciénaga de "El Totumo" y su cultivo experimental en estanques. *INDERENA-Rev. Divulgación Pesquera*, 1 (10): 1-73.
- Newmark-Umbreit, F. & A. Vallejo-Isaza.** 1995. Estudio epizootiológico de *Penaeus vannamei* en tres fincas camaroneras del Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar.*, 28: 19-41.
- Newmark-Umbreit, F., L. A. Torres, N. Bahamón, A. Vallejo-Isaza & I. Moreno-Amezquita.** 1997. Desarrollo y optimización del cultivo de camarones marinos. Proy. IP-2169-09-030-93 CENIACUA / COLCIENCIAS. Cartagena (Bol.). Inf. Final.
- Norse, E. A. & M. Estéves-Rueda.** 1977. Studies on portunid crabs from the Eastern. I. Zonation along environmental stress gradients from the coast of Colombia from the coast of Colombia. *Mar. Biol.*, 40: 365-373.
- Nunan, L. M., C. R. Pantoja, M. Salazar, L. F. Aranguren-Caro & D. V. Lightner.** 2004. Characterization and molecular methods for detection of a novel spiroplasma pathogenic to *Penaeus vannamei*. *Diseases of Aquatic Organisms*, 62: 255-264.
- Paz-Torres, A.** 2000. Caracterización preliminar de parásitos metazoos en la mojarra rayada *Eugerres plumieri* Valenciennes, 1830 (Perciformes: Gerreidae). Seminario de Investigación. Fac. Biol. Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, s.p.
- Pearse, A. S.** 1916. An account of the Crustacea collected by the Walker Expedition to Santa Marta, Colombia. *Proc. U. S. National Museum*, 49 (21-23): 531-557.
- Pérez-Bravo, G. I. & A. M. Pimienta-Gómez** 1997. Determinación de la concentración mínima inhibitoria adecuada para el tratamiento de las principales enfermedades bacterianas de los estados larvales de camarones peneidos. *Fac. de Ciencias. Depto. de Bacteriología. Pontificia Univ. Javeriana*, 148 p.
- Platz-Marroquín, C. A.** 2005. Presencia del agente causal de la hepatopancreatitis necrotizante (NPH) en el plancton y fauna bentónica en piscinas de cría y levante. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Quijada, J., C. A. Lima dos Santos & N. Avdalov.** 2005. Enfermedades parasitarias por consumo de pescado. Incidencia en América Latina. *Rev. INFOPECA Internacional*, 6: 16-23.
- Ramos-Tafur, G. E.** 1995. *Neopontonides henryvonprahli*, una nueva especie de camarón pontónino del Pacífico de Colombia (Decapoda: Palaemonidae) simbionte de las gorgonias *Muricea robusta* y *Lophogorgia alba*. *Rev. Biol. Trop.*, 43 (1-3): 231-237.
- Rathbun, M. J.** 1915. New freshwater crabs (*Pseudothelphusa*) from Colombia. *Proc. Biol. Soc. Wash.*, 28: 95-100.
- Riaño-Silva, R.** 1990. Patología y tratamiento aplicado a larvas y postlarvas cultivadas en laboratorios, de los camarones *Penaeus schmitti* Burkenroad, 1936 y *Penaeus vannamei* Boone, 1931. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 88 p.
- Rivera-Monroy, V. H., R. R. Twiley, F. Newmark, L. A. Torres, N. Bahamón, A. Vallejo, I. Moreno, & D. Gautier.** 1996. An analysis of shrimp pond dynamics in three semi-intensive farms along the Caribbean coast of Colombia: Basis for a dynamic simulation model. Univ. Southwestern Louisiana / INVEMAR / CENIACUA. Lafayette (Louisiana) / Santa Marta (Magdalena) / Cartagena (Bolívar). Technical Report.
- Roa-Angulo, V. P.** 2001. Mecanismo de defensa del camarón blanco *Penaeus vannamei*, bajo variaciones controladas de parámetros fisicoquímicos. Tesis Profesional. Fac. Microbiol. Industrial. Pontificia Univ. Javeriana.
- Rocha de Campos, M.** 2005. Freshwater crabs from Colombia: A taxonomic and distributional study. *Acad. Colomb. Cienc., Col. Jorge Álvarez Lleras*, 24: 1-364.
- Saavedra-Bucheli, M.** 1995. Análisis de la incidencia del protozoo gregarina (Sporozoa), en cultivos de *Penaeus vannamei* y *P. stylirostris* del Caribe colombiano. Tesis Profesional. Fac. Biología Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 143 p.
- Saavedra-Bucheli, M., R. Álvarez-León & I. Rey-Carrasco.** 2008. Análisis de la incidencia de gregarinas en cultivos comerciales de *Litopenaeus vannamei* y *L. stylirostris*, en el sur del Caribe colombiano. *UFC-Arquivos de Ciências do Mar*, 41 (1): 5-22.
- Schoppe, S.** 1995. La asociación entre *Acyrtus rubiginosus* (Gobiesocidae), *Clastocheilus vanderhorsti* (Porcellanidae), *Ophiotrix* sp. (Ophiotrichidae) y su hospedero perforador de roca *Echinometra lucunter* (Echinometridae) en el litoral rocoso de Santa Marta, Colombia. Convenio INVEMAR / Justus-Liebig Universitat. Giessen (Alemania). Resumen Inf. Técnico, 3 p.
- Schoppe, S. & B. Werdning.** 1996. The boreholes of the sea urchin genus *Echinometra* (Echinodermata: Echinoidea: Echinometridae) as a microhabitat in tropical South America. *Marine Ecology*, 17 (1-3): 181-186.
- Suárez-Navarrete, J. A.** 2002. Programa sectorial de desarrollo tecnológico y científico para la protección a nuevas enfermedades del camarón marino *Litopenaeus vannamei*. Proy. 361-99 CENIACUA / COLCIENCIAS. Cartagena (Bol.). Inf. Final.
- Suárez-Navarrete, J. A., R. Bador, A. García, M. F. Virguez, M. Arévalo, F. Aranguren, J. Cuellar & F. Newmark.** 1998. Establecimiento de criterios de calidad de la semilla de camarón. Proy. IP-6507-09-386-94-05. Cartagena (Bol.). Inf. Final.
- Vallejo-Isaza, A.** 1996. Estatus de sanidad de camarones *Penaeus vannamei* cultivados en tres fincas productoras del Caribe colombiano, con énfasis en las enfermedades causadas por agentes virales. Tesis Profesional. Fac. Biología Marina, Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 115 p.
- Vallejo-Salazar, A.** 1997. Manual de métodos de diagnóstico de enfermedades en camarones cultivados. CENIACUA. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico.

- Vallejo-Isaza, A. & F. Newmark.Umbreit.** 1997. Estudio epizootiológico de *Penaeus vannamei* en tres fincas camaroneras del Caribe colombiano. Bol. Invest. Mar., 28: 19-41.
- Vargas-Sánchez, A. V., J. L. Barragán-Becerra, V. P. Roa-Angulo & A. J. Varela de Ávila.** 2001a. Evaluación de dietas inmunostimuladoras postinoculación experimental con *Vibrio parahaemolyticus* sobre parámetros inmunológicos del sistema de defensa del camarón blanco *Litopenaeus vannamei*. Proy. 6507-09-329-97 CENIACUA / COLCIENCIAS. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 10 p.
- Vargas-Sánchez, A. V., J. L. Barragán-Becerra, V. P. Roa-Angulo & A. J. Varela de Ávila.** 2001b. Efecto de las variaciones de parámetros fisicoquímicos en el mecanismo de defensa del camarón blanco *Litopenaeus vannamei*. Proy. 6507-09-329-97 CENIACUA / COLCIENCIAS. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 11 p.
- Vargas-Sánchez, A. V., O. M. Vidal-Orjuela, A. J. Varela de Ávila, J. L. Barragán-Becerra, & V. P. Roa-Angulo.** 2001c. Efecto de la inoculación experimental de *Vibrio parahaemolyticus* sobre algunos parámetros inmunológicos del sistema inmune del camarón blanco *Litopenaeus vannamei*. Proy. 6507-09-329-97 CENIACUA / COLCIENCIAS. Cartagena (Bol.). Inf. Técnico, 9 p.
- Vargas-Sánchez, A. V., A. J. Varela de Ávila, J. L. Barragán-Becerra, V. P. Roa-Angulo & O. M. Vidal-Orjuela.** 1997. Análisis del efecto de las condiciones de estrés y de compuestos inmunostimuladores, en respuesta inmune y en parámetros fisiológicos de camarones peneidos. Proy. 6507-09-329-97 CENIACUA / COLCIENCIAS. Cartagena (Bol.). Resumen Ejecutivo.
- Varela de Ávila, A. J.** 2001. Evaluación de los mecanismos de defensa del camarón blanco *Penaeus vannamei*, a través de la inoculación experimental de la bacteria *Vibrio parahaemolyticus*. Tesis Profesional. Fac. Microbiol. Industrial. Pontificia Univ. Javeriana.
- Victoria-Daza, P.** 1987. Taxonomía, osteología, toxicidad y biología comparada del género *Sphyaena* (Pisces: Perciformes: Sphyaenidae) en la región de Santa Marta (Magdalena, Colombia). Tesis M. Sc. Fac. de Ciencias. Univ. Nal de Colombia, 253 p.
- Vidal-Orjuela, O. M.** 2001. Pruebas patogenicidad de las especies bacterianas *Vibrio* y *Flavobacterium* por inoculaciones en camarón blanco. Tesis Profesional. Fac. Biol. Marina. Univ. de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Vidal-Orjuela, O. M., C. B. Granja, L. F. Aranguren-Caro, J. A. Brock & M. Salazar-Vallejo.** 2001. A profound effect of hyperthermia upon the survival of *Litopenaeus vannamei* juveniles infected with the white spot syndrome virus. J. World Aquacul. Soc., 32 (4): 364-372.
- Wedler, E.** 1998. Introducción en la acuicultura, con énfasis en los neotrópicos. CORPAMAG / GTZ / UDA / UDM / Granja Piscícola La Katia. Litoflash. Santa Marta (Magdalena) Colombia, 388 p. + 12 planchas.
- Welcomme, R. L.** 1981. Registro de transferencias internacionales de especies de peces de aguas continentales. FAO. Doc. Tec. Pesca (213): 1-20.
- . 1988. International introductions of island aquatic species. FAO Fish. Tec. Pap., 294: 1-318.
- Werding, B. & H. Sánchez-Moreno.** 1984. Pinnotherid crab of the genus *Dissodactylus* Smith, 1870, associated with irregular sea urchins at the Caribbean coast of Colombia (Crustacea: Brachyura: Pinnotheridae). Zool. Meded., 63 (4): 35-42.
- Williams, E. H., L. B. Buckley-Williams & C. J. Sanner.** 1994. New host and locality records for copepod and isopod parasites of Colombian marine fishes. J. Aquatic Animal Health, 6: 362-364.
- Young, P. S. & N. H. Campos-Campos.** 1988. Cirripedia (Crustacea) de la zona intermareal e infralitoral de la región de Santa Marta. An. Inst. Invest. Mar. Punta de Betín, 18: 153-164.

Recibido: octubre 14 de 2008

Aceptado: febrero 2 de 2009