

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXII

SEPTIEMBRE DE 2008

NÚMERO 124

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Botánica (Botany)		[Effect of the Spatial Curvature of the Universe on the Angular Spectrum of the Temperature Anisotropies in the Cosmic Background Radiation] <i>Gabriel A. Mariño & Yeinzon Rodríguez</i>	373
Sistema de información para el manejo de datos moleculares en café: I. Desarrollo y uso de herramientas [Information system for the management of molecular data in coffee: I. Development and use of tools] <i>Luis Fernando Rivera, Carlos Eduardo Orozco, Andrés Chalarca, Álvaro León Gaitán Bustamante & Marco Aurelio Cristancho Ardila</i>	317	Historia de la Ciencia (History of Science)	
Sistema de información para el manejo de datos moleculares en café: II. Desarrollo de bases de datos [Information system for the management of molecular data in coffee: II. Development of databases] <i>Luis Fernando Rivera, Carlos Eduardo Orozco, Andrés Chalarca & Marco Aurelio Cristancho Ardila</i>	325	La Geometría compleja sintética en la obra temprana de Julio Rey Pastor [Complex synthetic geometry in Julio Rey Pastor's early work] <i>Luis Español González</i>	381
Monilofitos y Licofitos de la cuenca del Río Chinchiná (Caldas, Colombia). Clave para géneros y catálogo de las especies [Monilophytes and Lycophytes of the Chinchiná Basin (Caldas, Colombia). A key for the genera and annotated check list of the species] <i>David Sanín, Luis M. Álvarez Mejía, Julio C. Mancera Santa, Natalia Castaño Rubiano & Germán González Ocampo</i>	331	Química (Chemistry)	
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		Desviaciones presentadas por la solubilidad del Naproxén en mezclas cosolventes etanol + agua frente al modelo logarítmico-lineal de Yalkowsky y Roseman [Deviations from Yalkowsky - Roseman log-linear solubility equation for naproxen in ethanol + water cosolvent mixtures] <i>Diana P. Pacheco & Fleming Martínez</i>	403
Rocas volcánicas basálticas en la región de Luruaco. Departamento del Atlántico - Colombia [Basaltic volcanic rocks in Luruaco region, Atlantico Department, Colombia] <i>Jaime Galvis Vergara & Alcides Huguett Granados</i>	353	Zoología (Zoology)	
Física (Physics)		Bioerosión por poliquetos espionidos (Polychaeta, Spionidae) en moluscos marinos del Cuaternario caribeño de Colombia [Bioerosion by spionid polychaetes (Polychaeta, Spionidae) in marine molluscs from the caribbean Quaternary of Colombia] <i>Rosa Domènech, Jordi Martinell & Jaime de Porta</i>	411
Modelado y simulación de microestructuras para la manipulación de micropartículas [Modeling and simulation of microstructures for handling microparticle] <i>Flavio Humberto Fernández Morales, Julio Enrique Duarte y Josep Samitier Martí</i>	361	Diversidad y biogeografía preliminar de las mariposas saltarinas (Lepidoptera: HesperIIDae) de Colombia [Diversity and biogeography preview of the butterflies skippers (Lepidoptera: HesperIIDae) from Colombia] <i>Luis Antonio González Montaña & M. Gonzalo Andrade-C.</i> ...	421
Efecto de la curvatura espacial del universo en el espectro angular de las anisotropías en la temperatura de la radiación cósmica de fondo		Constitución de la Academia (Members of the Academy).....	435
		Publicaciones de la Academia (Publications of the Academy).....	437

SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA EL MANEJO DE DATOS MOLECULARES EN CAFÉ: I. DESARROLLO Y USO DE HERRAMIENTAS

Por

Luis Fernando Rivera, Carlos Eduardo Orozco, Andrés Chalarca, Álvaro León Gaitán
Bustamante & Marco Aurelio Cristancho Ardila¹

Resumen

Rivera, L.F., C.E. Orozco, A. Chalarca, A.L. Gaitán Bustamante & M.A. Cristancho Ardila: Sistema de información para el manejo de datos moleculares en café: I. Desarrollo y uso de herramientas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(124): 317-324, 2008. ISSN 0370-3908.

Con la gran cantidad de información que en la actualidad se obtiene en los proyectos de estudio de genomas, es necesario crear una estrategia para que los datos sean almacenados y estructurados de forma que sean fácilmente accesibles.

Para tal efecto se desarrolló en Cenicafé un sistema de información de datos genómicos LIMS el cual, basado en su mayoría en herramientas libres, permitió construir un sistema a bajo costo y de alta calidad, con los aplicativos necesarios para asistir las necesidades en estudios de genómica. Este sistema está especializado para el manejo de información relacionada con secuencias de EST's, BACs y Microsatélites de varias especies de café, la broca *Hypothenemus hampei* y el hongo *Beauveria bassiana*. Para el análisis de la información se crearon "pipelines" específicos para proceder con el agrupamiento, análisis y anotación de las secuencias. Con esta información se generó un modelo relacional de bases de datos para su almacenamiento, se diseñaron interfaces Web con motores de búsqueda especializados y se incorporaron herramientas para despliegue gráfico de ensamblajes de genes, anotaciones, datos estadísticos y otra información relacionada.

El presente sistema es accesible desde la Intranet de Cenicafé mediante un mecanismo de autenticación de usuarios, permitiendo acceder a los datos de forma rápida y eficiente. Este sistema se encuentra en constante cambio debido a las continuas actualizaciones de los datos obtenidos en los proyectos de genoma de Cenicafé y de los datos de secuencias contenidos en los bancos de datos mundiales.

Palabras clave: bases de datos biológicas, bioinformática, software libre, café, LIMS, Sistema Integrador de Manejo de Laboratorio.

¹ Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFÉ, Plan Alto, Chinchiná, Caldas. Correo electrónico: marco.cristancho@cafedecolombia.com

Abstract

Given the large amount of information that is currently obtained in genome study projects, is necessary to create a strategy to store and organize the data so that it is easily accessible to scientists.

For such effect Cenicafé developed a genomic oriented Laboratory Integrated Management System - LIMS which, based on GPL tools, permitted to build a low cost and high-quality system, with the essential applications needed to fulfill genomic studies. The system is specialized for the management of information related to EST sequences, BACs and Microsatellites of several species of coffee, the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* and the fungus *Beauveria bassiana*. For the analysis of the information we wrote specific pipelines to proceed with the grouping, curation and annotation of the sequences. A database relational model was created for storage of the information generated, Web interfaces with specialized search engines were designed and tools for displaying gene assemblies graphics, annotations, statistical data and other related information were incorporated in the system.

The current system is accessible from the Cenicafé Intranet by means of a user authentication mechanism, permitting an efficient and fast way of accessing the data. The system is in constant change due to the continuous updating of the data obtained in the genome projects at Cenicafé and of sequence data stored in world databases.

Key words: biological data base, bioinformatics, open source software, coffee, LIMS, Laboratory Integrated Management System.

Introducción

Con los grandes volúmenes de información actualmente en el orden de Terabytes que se obtienen en los proyectos de estudio de genomas, es necesario crear una manera para que los datos sean almacenados y catalogados de forma que sean fácilmente accesibles. Este almacenamiento debe realizarse de una manera en que los investigadores puedan adquirir y comparar datos particulares almacenados en grandes volúmenes de información. Los datos deben ser también organizados de forma que las relaciones entre ellos sean simples de entender. De igual manera y en lo posible, los datos deben ser almacenados en un lenguaje unificado que evite confusión con datos similares de otros laboratorios para lo cual se optó por SQL para la manipulación de información en bases de datos y XML para la comunicación con sistemas externos. De esta forma es posible en la actualidad, compartir recursos de Bioinformática entre diferentes grupos de investigación sin que la integridad de los datos se vaya a ver en peligro (Teufel *et al.*, 2006).

Aunque existen muchos sistemas desarrollados para el manejo de datos moleculares como ESTIMA (Charu *et al.*, 2004) o el sistema del SGN en la Universidad de Cornell (Mueller *et al.*, 2005), es necesario en la mayoría de los casos integrar varios de estos sistemas en uno propio o desarrollar un sistema totalmente novedoso (Rhee *et al.*, 2006). Para el caso de Cenicafé decidimos desarrollar un sistema totalmente nuevo pero teniendo en cuenta los desarrollos de otros grupos, especialmente de la Universidad

de Cornell y TIGR (The Institute for Genomic Research), centros que han sido nuestros cercanos colaboradores.

En el presente trabajo se describe el desarrollo de un sistema de información de datos genómicos, sistema accesible desde la Intranet de Cenicafé mediante un mecanismo de autenticación de usuarios, permitiendo acceder a los resultados de los análisis realizados de forma rápida y eficiente. Este sistema se encuentra en constante cambio debido a la producción de nuevos datos en los proyectos de genoma desarrollados en Cenicafé y a las continuas actualizaciones de los datos biológicos contenidos en bancos de datos mundiales.

Materiales y métodos

1. Hardware

Para ofrecer un eficiente servicio a los investigadores se requiere de una plataforma estable y de alto desempeño. Para ello el área de Bioinformática ha adquirido equipos de última tecnología. La plataforma que se utilizó para los desarrollos del sistema está compuesta por:

- 4 IBM e325 con 2 procesadores AMD opteron de 2.4GHz, 4GB de RAM, 2 discos duros SCSI de 74GB c/u.
- 1 IBM X346 con 2 procesadores Intel Xeon EMT64 de 3.6GHZ, 5GB de RAM, 6 discos duros UltraSCSI 320 de 300GB c/u.

- 1 IBM X345 con 2 procesadores Intel Xeon de 3.06 GHz, 4GB de RAM, 6 discos duros SCSI de 74.6 GB c/u.
- 1 SunFire v240.
- 1 Power Mac G5 con 2 procesadores G5 de 2.7GHz, 2 GB de RAM, 2 discos duros serial ATA de 250 c/u.
- 1 Apple xserve quad Xeon de 2GHz, 4GB de RAM, 1 disco duro serial ATA de 750GB.
- 2 IBM Intellistation aPro.
- Rack netbay 42.
- Cisco Catalyst 3750.

El poder de cómputo del sistema se expresa en FLOPS, operaciones de punto flotante por segundo, para cuantificar esto se utiliza la herramienta flops.c desarrollada en el lenguaje C que genera estadísticas de rendimiento del sistema mediante operaciones intensivas de punto flotante:

IBM x346: 1,7 GFLOPS

IBM e325: 3,1 GFLOPS

Power Mac G5: 2 GFLOPS

Apple xserve: 6.1 GFLOPS

IBM Intellistation A pro: 1,1 GFLOP

GFLOPS totales: $1,7+(3.1 \times 4)+2+6.1+(1,1 \times 2)=24,4$ GFLOPS

En cuanto al almacenamiento de los datos se cuenta con un servidor IBM x346 con 1.2 TeraBytes en RAID 5 al 70 % de su capacidad máxima lo que muestra la gran cantidad de datos procesados por las diferentes herramientas computacionales.

El sistema de respaldo de los datos consta de una unidad de cinta de 800 Gigas de capacidad máxima, adicionalmente se hacen copias de respaldo de los datos más importantes en DVDs.

Esta estructura en hardware es utilizada para prestar servicios de análisis de datos genómicos, procesamiento masivo a través de Grid (varias máquinas computan un mismo proceso simultáneamente), interfaces para consulta de información y almacenamiento de datos. Para lograr la correcta sincronización del sistema, se debe contar con la debida configuración entre cada uno de los componentes del hardware.

2. Software

Para el desarrollo e implementación del sistema se ha utilizado en su mayoría software de distribución libre. El software se puede agrupar de acuerdo a sus características y responsabilidades en: sistema Operativo, Servidores, lenguajes de programación, herramientas de análisis, cluster, Grid y software de desarrollo.

2.1 Sistemas Operativos: como sistemas operativos se tienen instalados Mac OSX 10, Solaris10, Debian 3.1 Sarge y Ubuntu. Se optó por el uso de estos sistemas operativos ya que permiten la administración de los recursos del hardware de una manera eficiente y estable.

2.2 Sistemas manejadores de Bases de datos: MySQL versión 5.0.27 (www.mysql.com) es una de las bases de datos más populares desarrolladas bajo la filosofía de código abierto; PostgreSQL versión 8.1.4 (www.postgres.org): es un servidor de base de datos relacional libre, liberado bajo la licencia BSD (Berkeley Software Distribution).

2.3 Servicio de Directorios: Samba versión 3.0.14a (www.samba.org) permite al usuario final el acceso a archivos, impresoras u otros dispositivos compartidos en una red Intranet o en Internet. NFS (Network File System) es un sistema de archivos distribuido para un entorno de red de área local entre máquinas Unix/Linux. Posibilita que distintos sistemas conectados a una misma red accedan a archivos remotos como si se tratara de locales.

2.4 Servicios Web: Apache versión 1.3.34 y Apache2 versión 2.0.59 son servicios que trabajan a través del protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol).

2.5 Conexión remota: Open SSH es una herramienta que permite la administración remota de servidores con la característica de que la información transmitida a través de este servicio viaja encriptada.

2.6 Lenguajes de programación: PERL: Practical Extraction and Report Language. Un lenguaje de script de propósito general desarrollado principalmente para la manipulación de texto pero está ampliamente difundido en muchas otras tareas como administración del sistema, desarrollo web, programación para redes entre otras; PHP5: acrónimo de "Hypertext Preprocessor", originado inicialmente del nombre PHP Tools, o Personal Home Page Tools es un lenguaje de programación interpretado utilizado para desarrollo web; XML: XML es el acrónimo del inglés Extensible Markup Language (lenguaje de marcado ampliable o extensible) desarrollado por el World Wide Web Consortium (W3C); JavaScript: es un lenguaje interpretado orientado a las páginas Web, con una sintaxis semejante a la del lenguaje Java; C: lenguaje de programación compilado.

2.7 Herramientas de análisis: se cuenta con una gran variedad de herramientas de análisis y se utilizan para realizar diferentes tipos de análisis, limpieza de vectores y contaminantes, asignación de valores de calidad a las secuencias, herramientas de anotación, alineación, predicción y comparación. Entre ellas podemos encontrar herramientas como Blast (Altschul *et al.*, 1990), MPI-Blast (Darling, 2008), MPI-Clustalw (Li, 2003), Codon Code Aligner (www.codoncode.com/aligner/), GenScan (Burge y Karlin, 1997), InterproScan (Zdobnov y Apweiler, 2001), Lucy (www.tigr.org), MEME (Bailey *et al.*, 2006), MISA (Thiel *et al.*, 2006), PHRED (Ewing *et al.*, 1998), PRIMER3 (Rozen y Skaletsky, 1998), RedBlast (perl script desarrollado en Cenicafé), RepeatMasker (Smit *et al.*, 2004), SeqClean (Perteau *et al.*, 2006), Tgicl (Perteau *et al.*, 2006) y WU-Blast (Gish, 2005).

De igual forma el sistema incorpora la herramienta de visualización Gbrowse (Stein *et al.*, 2002) la cual permite ver detalles de secuencias largas como pseudomoléculas (BACs); en la actualidad esta herramienta despliega detalles de la secuencia completa del cloroplasto de *C. arabica*.

2.8 Cluster y Grid: LAM-MPI: librerías para desarrollo de aplicaciones de procesamiento paralelo, utilizadas en HPC (High Performance Computing) cuya ventaja radica en que divide un proceso en varios más pequeños, permitiendo ejecutarlos en un grupo de máquinas que integran el cluster; por otro lado SGE: Sun Grid Engine, es un sistema de computación paralela que a diferencia del cluster puede estar conformado por máquinas de diferentes plataformas y que además pueden encontrarse localizadas en diferentes sitios.

Actualmente en estos sistemas de computación paralela se ejecutan los procesos de:

InterproScan: usa el sistema grid SGE.

MPI-BLAST: usa el sistema cluster LAM-MPI.

2.9 Software de desarrollo: Macromedia DreamWeaver: es una herramienta IDE (Entorno de desarrollo integrado), que permite desarrollar elementos Web de una forma dinámica y eficiente; SubVersion: herramienta multipropósito para administración de versiones, principalmente utilizada en grupos de desarrollo de software.

Resultados

1. Desarrollo del Sistema

Contamos con una plataforma heterogénea de hardware que reúne la arquitectura Spark de Sun Mycosystem, Mac de Apple, X86_64 de AMD e Intel, la cual está actualmente conectada a través de una red Gigabit (1Gb/s). El esquema de la plataforma se detalla en la Figura 1.

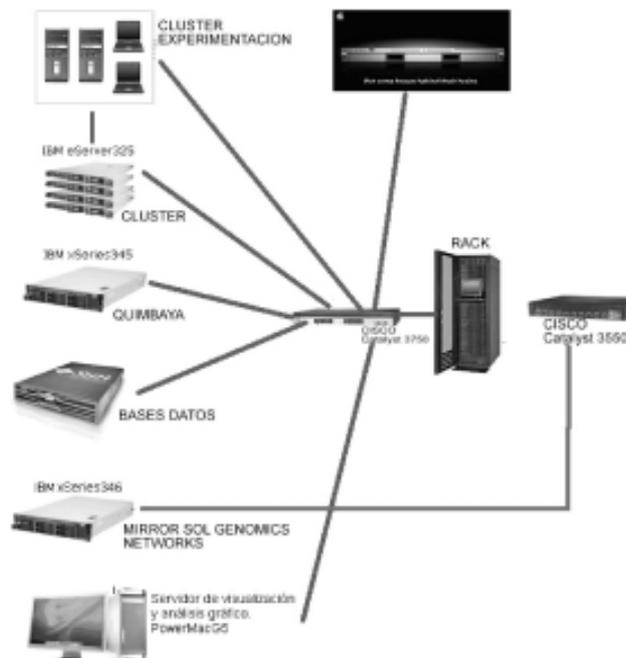


Figura 1. Organización física del Hardware.

La plataforma de software está distribuida teniendo en cuenta la arquitectura con el fin de evitar conflictos entre algunos procesos. El servidor Quimbaya ofrece los servicios Web, directorios compartidos, aplicaciones, autenticación de usuarios y sobre el cual se ejecutan las copias de seguridad. Sobre este además se encuentran instalados los scripts para análisis de secuencias tanto de DNA como de cDNA y el sistema de información como tal. Las bases de datos se encuentran ubicadas en el servidor SUN FIRE V240 denominado TAYRONA, sobre el cual se instalaron los motores de bases de datos MySql y PostgreSQL. Para suplir las demandas de procesamiento se optó por la construcción de tres Clusters independientes donde el primero está conformado por 4 IBM Series 345 y se encarga principalmente de procesos como InterproScan y BlastX. El segundo cuenta con dos máquinas MAC Apple Xserver y G5 respectivamente donde además de ejecutar los procesos anteriores se usa para efectos de despliegue gráfico de información. Como complemento a la labor de adaptación de nuevas tecnologías de procesamiento masivo, se cuenta con un cluster de experimentación conformado por dos IBM Work Station. Finalmente se cuenta con un servidor IBM Xseries 246 cuyo único propósito es el de alojar una copia del sistema de información de SGN de Cornell el cual brinda información genómica de diferentes especies de plantas. El sistema para consultas Web está diseñado para manejar gran cantidad de usuarios simultáneos (Figura 2).

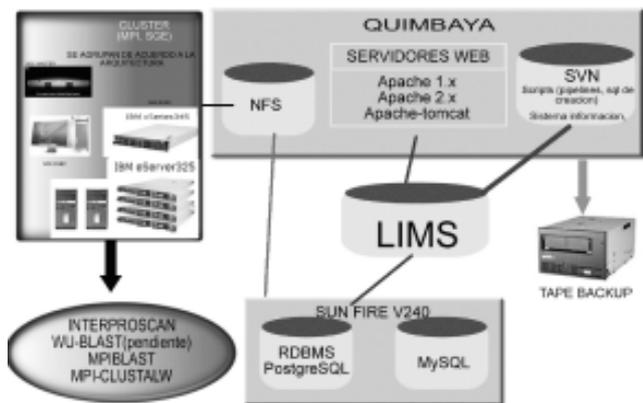


Figura 2. Organización de servicios y herramientas Bioinformáticas.

En la Figura 3 se detalla el sitio de acceso al servidor que contiene las bases de datos y las herramientas de Bioinformática que están disponibles para los investigadores del proyecto del genoma en Cenicafé. El acceso al sitio se realiza por autenticación de palabras claves que son asignadas a los líderes de experimentos de este proyecto.

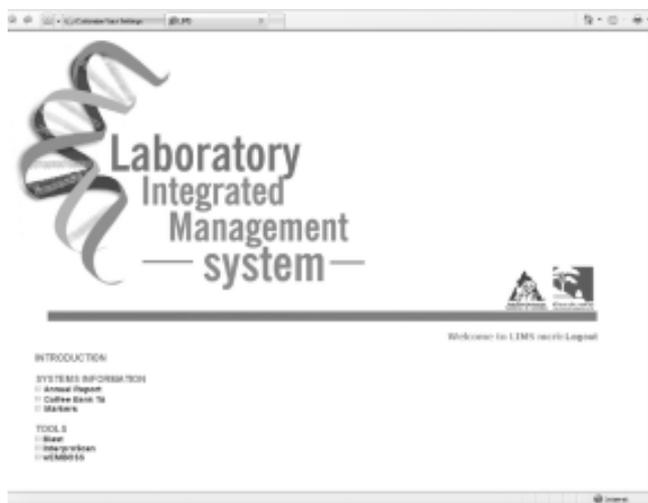


Figura 3. Sitio de acceso interno (quimbaya.cenicafe.org) a las bases de datos y herramientas de Bioinformática de Cenicafé.

Administración del sistema

El sistema actualmente se administra remotamente a través de OpenSSH (Security shell) con autenticación a través de password, a excepción del servidor *mirror*, el cual se detallará más adelante, que se autentica con llave privada DSA de 1024 bits. El DSA es un algoritmo de

firma digital, estándar del Gobierno Federal de los Estados Unidos de América o FIPS para firmas digitales. Fue un Algoritmo propuesto por el Instituto Nacional de Normas y Tecnología de los Estados Unidos para su uso en su Estándar de Firma Digital (DSS), especificado en el FIPS 186. DSA se hizo público el 30 de agosto de 1991; este algoritmo, como su nombre lo indica, sirve para firmar y para cifrar información.

A futuro se proyecta crear interfaces de usuario para la administración de servicios como SAMBA, NFS, MPI y SGE y realizar e implementar las reglas establecidas para la realización de copias de seguridad a través de un tape Backup.

Descarga remota de archivos

Las descargas de bases de datos biológicas se realizan de forma automática mediante el uso de programas especializados, mientras que las actualizaciones al Sistema Operativo y software de Bioinformática se efectúan de manera manual según se requiera.

Visualización de la información

Se ha optado por el uso de un ambiente Web para la visualización de todos los análisis realizados en el sistema. Las interfaces para el manejo de secuencias de ESTs han sido dotadas de motores de búsqueda especializados así como herramientas de despliegue gráfico de ensamblajes, todo esto con el fin de adaptarse a las necesidades de los investigadores del centro.

2. Servicios Implementados

wEMBOSS

El wEMBOSS es una interfaz web para el Emboss que es una herramienta biológica para el análisis de secuencias. Esta herramienta es el resultado de un esfuerzo combinado entre el nodo EMBnet de Argentina y el nodo EMBnet de Bélgica (**Rice et al., 2000**).

INTERPROSCAN

InterPro (**Mulder et al., 2003**) es un sistema integrador de diversas bases de datos de familias de proteínas, dominios y regiones funcionales, las cuales identifican características encontradas en proteínas conocidas con el fin de ser utilizadas en proteínas desconocidas y la interfaz de búsqueda del sistema se conoce como InterProScan (**Zbodanov y Apweiler, 2001**). Las anotaciones de Interpro también permiten a los investigadores tener la información de "Gene Ontology" (**Ashburner et al., 2000**) para cada una de sus secuencias.

En nuestro sistema contamos con esta herramienta para que los investigadores puedan hacer análisis localmente, ya que esta herramienta hace uso del cluster que se tiene implementado en el área de Bioinformática de Cenicafé. Actualmente contamos con las bases de datos de InterPro, IprMatches, PIR, Pfam, Pfam-A, Pfam-Clan, PRINTS, Smart, SUPERFAMILY y TIGR.

BLAST a través de la Web

Esta herramienta permite hacer búsquedas eficientes de secuencias de interés dentro de las secuencias generadas en los proyectos de Cenicafé por medio de la implementación Web del programa WU-BLAST, un derivado optimizado del programa original BLAST (Altschul *et al.*, 1990).

Servidores de servicio Web externo

Servidor *mirror* (sgn.cenicafe.org)

El sistema puso al servicio externo de la comunidad científica un "mirror" (sgn.cenicafe.org) del sitio SGN de la Universidad de Cornell que estudia las plantas de la familia Solanaceae y otras familias relacionadas. El servidor "mirror" nos ha permitido conocer internamente en detalle la administración de un sitio reconocido de estudio de genomas de plantas e implementar muchos de sus desarrollos en nuestros sistemas de uso interno.

Servidor Web del proyecto del genoma (bioinformatics.cenicafe.org)

Este es el sitio de información general del proyecto de estudio del genoma del café. Su interfaz gráfica se puede observar en la Figura 4 y el tráfico que ha tenido en los cuatro primeros meses de uso en la Figura 5. Es de anotarse



Figura 4. Sitio de acceso externo (bioinformatics.cenicafe.org) a la información general del proyecto del genoma de Cenicafé.

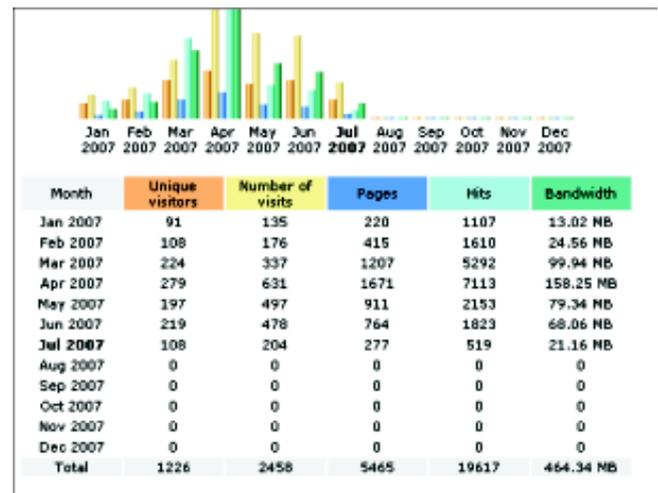


Figura 5. Estadísticas del sitio <http://bioinformatics.cenicafe.org>, durante el primer semestre del año 2007. Esta estadística de visitas se obtuvo con el programa awstat (<http://awstats.sourceforge.net/>) que es distribuido bajo licencia GNU-GPL.

que ya se cuenta con un tráfico elevado en este servidor Web, especialmente desde sitios en los Estados Unidos, lo cual aumenta la visibilidad del proyecto de estudio del genoma del café ante la comunidad científica internacional.

Discusión

Cenicafé ha desarrollado un sistema propio para el almacenamiento, análisis y despliegue en sistemas Web de la información de secuencias de ADN de café, la broca del café, el hongo *Beauveria bassiana* y otros organismos que se estudian en el Centro. El sistema ha sido desarrollado casi completamente con software de distribución libre lo que ha permitido rebajar los costos de desarrollo y al mismo tiempo, estar a la par con los centros de estudios de genoma del mundo ya que hemos utilizado un estilo de desarrollo similar gracias a las colaboraciones que hemos tenido con el grupo SGN de la Universidad de Cornell (sgn.cornell.edu) y el Instituto TIGR (en la actualidad el Craig Venter Institute).

El sistema descrito desarrollado en Cenicafé hace parte de las múltiples aplicaciones que en el ámbito mundial son desarrolladas en el área de la Bioinformática haciendo uso de herramientas Open Source (Código Abierto), las cuales en su mayoría bajo licenciamiento GPL (General Public License), permiten la libre distribución de software, reduciendo casi en un 100% los gastos de licenciamiento. Este sistema utiliza algunas herramientas desarrolladas en TIGR, el grupo SGN y otros grupos de investigación de Bioinformática en el mundo; sin embargo, el sistema nuestro

es único ya que está adaptado específicamente para analizar secuencias de diversos tipos de organismos estudiados en Cenicafé, utiliza los despliegues de información que solicitan los investigadores de genoma del centro, y tiene una plataforma Web de despliegue desarrollada completamente en Cenicafé.

En comparación con otros sistemas similares desarrollados, la plataforma de Cenicafé es muy novedosa ya que incorpora herramientas de análisis del wEMBOSS que casi ningún sistema incorpora, incluye el sistema de anotación InterproScan para uso en línea de los investigadores y tiene incorporados sistemas gráficos novedosos como el Gbrowse y otros sistemas gráficos para la visualización de ensamblajes de secuencias de ESTs. Para nuestro conocimiento, es el sistema más avanzado para el análisis y almacenamiento de secuencias de café en el mundo.

Actualmente los sistemas operativos de libre distribución como LINUX y otros licenciados como UNIX brindan el mejor desempeño y estabilidad para procesar y ejecutar volúmenes de información de diversas áreas de conocimiento, sin ser la Bioinformática la excepción. Además de tener en cuenta de que no solo el software licenciado brinda grandes prestaciones a los análisis y procesamiento de información, una muestra de ello son los grandes desarrollos que se encuentran en el mundo del software libre, donde compañías de gran prestigio como SUN, IBM y Novell colaboran en muchos de estos desarrollos.

Debido al gran crecimiento de Internet en los últimos años se ha hecho prácticamente una necesidad el montaje de sistemas basados en Web (**Tanenbaum, 1987**), que con solo el uso de un navegador permita a la comunidad científica desde cualquier punto del planeta acceder a su información, procesarla y redistribuirla si es del caso, con el fin de agilizar sus procesos de producción científica.

La seguridad es un factor decisivo a la hora de concebir sistemas basados en Web, debido a los múltiples ataques que día a día se presentan por parte de "Hackers", los cuales se enfocan en el bien más preciado de una compañía o institución, como lo es la información, la cual debe ser protegida ante cualquier perturbación o divulgación (en caso de ser información confidencial). Para tal efecto el sistema desarrollado cuenta con un sistema de autenticación basado en las normas actuales de privacidad de información, sistema que además de brindar seguridad al acceso de información vía web también cuenta con altos estándares de seguridad al nivel de la plataforma de hardware. Sobre este esquema planteado de seguridad se puede tener un alto control de las actividades que realizan los usuarios sobre el sistema de información.

También se espera mejorar la documentación y administración del sistema, haciendo uso de procesos de ingeniería de software para obtener un alto nivel de representación e interacción de los datos que contiene el sistema de información. De esta forma la meta es a futuro poder brindar un sistema funcional, escalable y seguro a toda la comunidad científica.

Para lograr las futuras metas es necesaria la generación de nueva información, tanto de librerías BAC, microarreglos y proteómica. Teniendo en cuenta que aunque se cuenta con un valioso grupo interdisciplinario, el grupo de Bioinformática necesita explorar más estas áreas de conocimiento para abarcar muchos aspectos que involucran escalar el sistema para administrar y representar este tipo de información. Además los procesos que este tipo de datos demanda en los análisis son demasiado complejos y consumen mucho tiempo de CPU, por ello se requiere un mejor núcleo de procesamiento para obtener resultados en un menor tiempo, sobre todo en los datos referentes a proteómica.

La libertad que ha brindado desarrollar nuestro propio sistema, nos ha posibilitado un mayor control a la hora de escalar el sistema a nuevos procesos y recursos. Donde muchos de estos cambios se efectúan basados en sistemas ya existentes que administran el mismo tipo de información (Básicamente el sistema de la Universidad de Cornell "SGN" y el sistema del TIGR "Transcript Assembly").

Conclusiones

Este trabajo es un buen ejemplo de las ventajas que trae la tecnología de la información a un centro de investigación, permitiendo que sus investigadores puedan compartir información de una forma rápida, flexible y segura, lo cual repercute en una mayor y veloz producción científica que trae grandes beneficios para Cenicafé, otros centros de investigación del país y otras dependencias de Fedecafé como el servicio de extensión. Para nuestro conocimiento, este es el primer sistema de información en Web, desarrollado usando herramientas de software libre, para manejo de datos moleculares en Colombia.

Agradecimientos

A la Dra. Robin Buell y su equipo de Bioinformática en TIGR por su colaboración en todas las etapas del trabajo, Sara Hunter y Martin Sarachu por sus recomendaciones para la instalación de las herramientas de Emboss e InterproScan, y al Dr. Lukas Mueller y el grupo de Bioinformática de la Universidad de Cornell por sus valiosas sugerencias y su ayuda para la implementación del

servidor *mirror*. Agradecemos muy especialmente al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la co-financiación del presente trabajo.

Referencias

- Altschul, S.F., Gish, W., Miller, W., Myers, E.W. and Lipman, D.J.** 1990. Basic local alignment search tool. *J. Mol. Biol.*, 215, 403-410.
- Ashburner M, Ball CA, Blake JA, Botstein D, Butler H, Cherry JM, Davis AP, Dolinski K, Dwight SS, Eppig JT.** 2000. Gene ontology: tool for the unification of biology. The Gene Ontology Consortium. *Nat Genet* 25: 25-29.
- Bailey TL, Williams N, Misleh C, Li W.** 2006. MEME: discovering and analyzing DNA and protein sequence motifs. *Nucleic Acids Research* 34: W369-W373.
- Burge, C., Karlin, S.** 1997. Prediction of complete gene structures in human genomic DNA. *J. Mol. Biol.* 268: 78-94.
- Charu G. K, Richard LeDuc, George Gong, Levan Roinishivili, Harris A. Lewin, Lei. Liu, W.M. Keck.** 2004. ESTIMA, a tool for EST management in a multi-project environment. *BMC Bioinformatics* 5: 176-200.
- Darling A.** 2008. mpiBLAST open source project, <http://MPIBLAST.lanl.gov/>
- Ewing B, Hillier L, Wendl M, Green P.** 1998. Basecalling of automated sequencer traces using phred. I. Accuracy assessment. *Genome Research* 8: 175-185.
- Gish W.** 2005. WU BLAST 2.0. [<http://blast.wustl.edu/blast/README.html>]
- Li K-B.** 2003. ClustalW-MPI: ClustalW analysis using distributed and parallel computing. *Bioinformatics* 19: 1585-1586.
- Mueller LA, Solow TH, Taylor N, Skwarecki B, Buels R, Binns J, Lin C, Wright MH, Ahrens R, Wang Y, Herbst EV, Keyder ER, Menda N, Zamir D, Tanksley SD.** 2005. The SOL Genomics Network. A Comparative Resource for Solanaceae Biology and Beyond. *Plant Physiology* 138: 1310-1317.
- Mulder NJ, Apweiler R, Attwood RK, Bairoch A, Barrell D, Bateman A, Binns D, Biswas M, Bradley P, Bork P, et al.** 2003. The Interpro database, 2003 brings increased coverage and new features. *Nucleic Acids Res* 31: 315-318.
- Pertea G, Huang X, Liang F, Antonescu V, Sultana R, Karamycheva S, Lee Y, White J, Cheung F, Parvizi B, Tsai J, Quackenbush J.** 2003. TIGR Gene Indices clustering tools (TGICL): a software system for fast clustering of large EST datasets. *Bioinformatics* 19: 651-652.
- Rhee, S.Y., Julie Dickerson, Dong Xu.** 2006. Bioinformatics and its Applications in Plant Biology. *Annu. Rev. Plant. Biol.* 57: 335-360.
- Rice, P., Longden, I., Bleasby, A.** 2000. EMBOSS: the European Molecular Biology Open Software Suite. *Trends Genet.* 16: 276-277.
- Rozen S, Skaletsky HJ.** 1998. Primer3. Code available at http://www-genome.wi.mit.edu/genome_software/other/primer3.html.
- Smit, AFA, Hubley, R, Green, P.** RepeatMasker Open-3.0. 1996-2004 <<http://www.repeatmasker.org>>.
- Stein LD, Mungall C, Shu S, Caudy M, Mangone M, Day A, Nickerson E, Stajich JE, Harris TW, Arva A, et al.** 2002. The generic genome browser: a building block for a model organism system database. *Genome Res* 12: 1599-1610.
- Teufel, A, Markus Krupp, Arndt Weinmann, Peter R. Galle.** 2006. Current bioinformatics tools in genomic biomedical research (Review). *International Journal of Molecular Medicine* 17: 967-973.
- Thiel T, Michalek W, Varshney RK, Graner A.** 2003. Exploiting EST databases for the development and characterization of gene-derived SSR-markers in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Theor Appl Genet* 106: 411-422.
- Zdobnov EM, Apweiler R.** 2001. InterProScan-an integration for the signature-recognition methods in InterPro. *Bioinformatics* 17: 847-848.

Recibido: octubre 30 de 2007.

Aceptado para su publicación: noviembre 21 de 2008.

SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA EL MANEJO DE DATOS MOLECULARES EN CAFÉ: II. DESARROLLO DE BASES DE DATOS

Por

Luis Fernando Rivera, Carlos Eduardo Orozco, Andrés Chalarca,
& Marco Aurelio Cristancho Ardila¹

Resumen

Rivera, L.F., C.E. Orozco, A. Chalarca & M.A. Cristancho Ardila: Sistema de información para el manejo de datos moleculares en café: II. desarrollo de bases de datos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(124): 325-330, 2008. ISSN 0370-3908.

Cenicafé ha realizado el desarrollo de una plataforma de Bioinformática para el almacenamiento, análisis y fácil accesibilidad de los datos del proyecto de estudio del genoma del café, la broca y el hongo *Beauveria bassiana*. Los proyectos que involucran la construcción de librerías de cDNA y el desarrollo de secuencias de ESTs tienen como objetivo general obtener el catálogo de genes de una especie en particular.

En el presente trabajo se describen las bases de datos desarrolladas en Cenicafé y las estadísticas de las secuencias depositadas en las mismas hasta Mayo del 2007. Estas bases de datos incluyen las correspondientes al análisis de "Transcript Assemblies" a partir de secuencias de ESTs, marcadores moleculares microsatélites (SSRs) y BES (BAC-End sequences). El sistema desarrollado tiene implementadas para su acceso interfaces Web, de fácil acceso y utilización por parte de los investigadores del proyecto de estudio de genoma desde cualquier computador de Cenicafé a través de un sistema de autenticación que permite mantener la seguridad de los datos. El sistema desarrollado permite un amplio crecimiento y el acceso a la información actualizada de cada especie estudiada en forma rápida y eficiente.

Palabras clave: Expressed Sequenced Tags, ESTs, bases de datos relacionales, análisis de secuencia, ensamblaje de transcritos.

¹ Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFÉ, Plan Alto, Chinchiná, Caldas. Correo electrónico: marco.cristancho@cafedecolombia.com

Abstract

Cenicafé has carried out the development of a Bioinformatics platform for the storage, analysis and easy accessibility of the data of the project that study the genomes of several coffee species, the coffee berry borer and the fungus *Beauveria bassiana*. The projects that involve the construction of cDNA libraries and the development of sequences of ESTs have as a common goal to catalogue the genes of a particular species.

In the present study we describe the databases developed at Cenicafé and the statistics of the sequences stored until May 2007. These databases include the corresponding analysis of "Transcript Assemblies" from sequences of ESTs, microsatellites molecular markers (SSRs) and BES (BAC-End sequences). The system developed has implemented Web interfaces for the access, easy accessibility and utilization for the scientists in genome projects since the system can be accessed from any computer at Cenicafé through a system of authentication that permits to maintain the data secure. The system developed permits an ample growth and the access to the information brought up to date of each species studied in an efficient and fast way.

Key words: Expressed Sequenced Tags, ESTs, relational databases, sequence analysis, transcript assemblies.

Introducción

A pesar de ser uno de los cultivos de mayor importancia a nivel mundial, la investigación genómica en café es muy reducida y existen muy pocas publicaciones sobre el tema en la literatura científica y muy pocas secuencias de su genoma depositadas en bases de datos públicas. En abril del 2007 existían menos de 10.000 secuencias de nucleótidos y secuencias de ESTs de la especie *Coffea arabica* y únicamente alrededor de 50.000 secuencias de la especie *C. canephora* depositadas en GenBank; para tener una comparación, de algunos cultivos como arroz, papa o tomate existen más de 1 millón de secuencias depositadas a la misma fecha. Las secuencias de ESTs son ensambladas en unigenes a través de sistemas especializados; el Instituto TIGR es uno de los sitios pioneros en el ensamblaje y análisis de secuencias de ESTs en secuencias únicas transcritas, sistema denominado "Transcript Assemblies" (<http://plantta.tigr.org/>). El único depósito relativamente grande de secuencias de la especie *C. canephora* lo realizó Nestlé en conjunto con investigadores de la Universidad de Cornell (Lin *et al.*, 2005). Dentro de los avances recientes en secuenciación de la especie *C. arabica*, investigadores de la Universidad de Florida completaron la secuencia del cloroplasto de la especie (Samson *et al.*, 2007); el análisis de la secuencia mostró una alta homología del cloroplasto de café con el de especies Solanaceas en cuanto a tamaño, número y orden de genes en su genoma.

Cenicafé ha realizado el desarrollo de una plataforma de Bioinformática para el almacenamiento, análisis y fácil accesibilidad de los datos del proyecto de estudio del genoma del café, la broca y el hongo *Beauveria bassiana*.

Los proyectos que involucran la construcción de librerías de cDNA y el desarrollo de secuencias de ESTs tienen como objetivo general obtener el catálogo de genes de una especie en particular (Teufel *et al.*, 2006).

En el presente trabajo se describen las bases de datos desarrolladas en Cenicafé y las estadísticas de las secuencias depositadas en las mismas hasta mayo del 2007. En un artículo adjunto se describen las herramientas, sistemas de bases de datos, software y hardware utilizados en el desarrollo del sistema.

Materiales y métodos

El Hardware y Software utilizados para el desarrollo del sistema Web y de las bases de datos se describen en un artículo acompañante.

Desarrollo del Sistema de información y análisis de ESTs, BACs y BES

A continuación se hará una descripción de cada una de las fases en el proceso de análisis de los productos de secuenciación provenientes de los ESTs (Expressed Sequenced Tags), secuencias de librerías BACs y secuencias BES (BAC End Sequences).

Fase 1. Descarga de Cromatogramas ("Trace Files")

Se obtienen los accesos a los respectivos sitios Web donde se encuentran depositados los cromatogramas y se inician las descargas haciendo uso del servidor central (denominado Quimbaya) el cual cuenta con un canal dedicado de 1Mbps.

Fase 2. Asignación de Nombres de Librería genómica

Se procede a renombrar, según sea necesario, cada una de las librerías y cada uno de los cromatogramas, tomando como referencia ciertos patrones de nomenclatura de acuerdo al tipo de librería, los tratamientos de los tejidos usados para su construcción y la especie.

Fase 3. Generación de Matrices de Calidad

Se hace uso del software Phred (Ewing *et al.*, 1998) para realizar la asignación de calidad a cada una de las bases que componen los cromatogramas. Como resultado se obtienen dos archivos por librería, uno que contiene las secuencias en formato Fasta y otro que contiene las matrices de calidad (rango 0-60).

Fase 4. Limpieza de Secuencias y resumen estadístico de calidad

Haciendo uso del Software Lucy (disponible en <http://www.tigr.org/software/sequencing.shtml>), se hace la limpieza de vectores y adaptadores usados en el proceso de clonación, además de la generación de códigos de descarte por secuencia (E= Secuencia Vacía, Q= Baja calidad, S= Inserto Corto, P= Inserto corto por PolyA, V= Vector). Las secuencias que no posean código de descarte pasan a la fase 5.

Fase 5. Limpieza de contaminantes

Haciendo uso del software Seqclean, se efectúa una búsqueda y eliminación general de secuencias contaminantes de *Escherichia coli* y las contenidas en la base de datos mundial de vectores Univec (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/VecScreen/UniVec.html>). Como resultado tenemos las secuencias limpias con sus respectivas matrices de calidad, además de un archivo de referencia para identificar los contaminantes encontrados.

Fase 6. Ensamblaje de secuencias (solo para secuencias de ESTs y BACs)

Haciendo uso del Software Tgi_cl (disponible en <http://www.tigr.org/software/other.shtml>), se realiza el ensamblaje de los clones resultantes de la fase 5. Como salidas del proceso se cuenta con la información detallada de conformación de Contigs (secuencias ensambladas) y Singletons (secuencias no ensambladas), la cual será posteriormente almacenada en la base de datos.

Fase 7. Enmascaramiento de secuencias (solo para secuencias BACs y BES)

Debido a que las secuencias producto de DNA genómico presentan un alto grado de repeticiones, se hace

necesario utilizar la herramienta RepeatMasker (Smit *et al.* 1996-2004), con la cual además de marcar las secuencias repetidas, se identifica el tipo y clase de repetición.

Fase 8. Identificación de Marcadores SSRs

Haciendo uso de la herramienta MISA-MicroSatellite identification tool (Thiel *et al.*, 2003), se realiza la búsqueda de secuencias SSR o microsátélites (Simple Sequence Repeats), las cuales son utilizadas como marcadores moleculares para la construcción del mapa molecular de *C. arabica*.

Fase 9. Predicción de Genes (solo para secuencias BACs y BES)

Haciendo uso de la herramienta GenScan (<http://genes.mit.edu/GENSCANinfo.html>) se puede hacer una aproximación en la localización de las regiones que representan genes y su respectiva representación a nivel de proteínas.

Fase 10. Creación del esquema de base de datos

Tomando como base los resultados en cada una de las fases anteriormente señaladas, se hizo la construcción de las bases de datos que internamente se denominan "Coffee TA" y "Coffee BACs" con el fin de almacenar y organizar sistemáticamente la información para análisis posteriores.

Fase 11. Carga de datos en el sistema

Haciendo uso de scripts desarrollados en el lenguaje de programación Perl y usando módulos de BioPerl (www.bioperl.org), se realiza el proceso de carga de información en las respectivas bases de datos.

Fase 12. Generación de estadísticas por librería

Haciendo uso del lenguaje SQL (Standar Query Language), se realizan las consultas necesarias sobre las bases de datos para la generación de la información requerida.

Fase 13. Proceso de Anotación

Tomando como referencia los Contigs generados en cada uno de los sistemas se procede a efectuar los correspondientes análisis de homología de secuencia con la herramienta MPI-BLASTX, con el fin de asociar a cada Contig una posible función.

Fase 14. Análisis Comparativo

Usando las herramientas WU-Blast (<http://blast.wustl.edu/>) y Blat (<http://genome.ucsc.edu/goldenPath/help/blatSpec.html>), se ejecutan los alineamientos necesarios para la identificación de secuencias homólogas con

secuencias de otros organismos en las secuencias de librerías BACs y secuencias BES.

Resultados y discusión

Ensamblaje de secuencias de ESTs

La construcción de ensamblajes de secuencias de ESTs se basó en el sistema "Transcript Assemblies - TAs" desarrollado en TIGR (<http://plantta.tigr.org/>). Las secuencias que se usan para construir los TAs son transcritos expresados colectados de librerías de cDNA (secuencias ESTs). A diferencia de los ensamblajes de TIGR, en los análisis de Cenicafé no incluimos secuencias que no tengan cromatogramas de los cuales podamos deducir datos de calidad de secuencia; los ensamblajes de TIGR se realizan a partir de secuencias de la división dbEST de la base de datos de GenBank.

Los TAs fueron ensamblados por medio de la herramienta TGICL (Perteau *et al.*, 2003), el programa especial de BLAST, Megablast (Zhang *et al.*, 2000) y el programa para ensamblaje de secuencias CAP3 (Huang y Madan, 1999). TGICL es un programa que invoca en su programación Megablast y CAP3. Las secuencias son inicialmente agrupadas basadas en comparaciones de todas contra todas, con Megablast; los agrupamientos son ensamblados en "clusters" para la generación de secuencias consenso usando CAP3. Los criterios de ensamblaje incluyeron una región mínima de traslape de 50bp, 95% de identidad mínima en esta región y máximo 20bp que no traslaparan en regiones de homología.

Cualquier secuencia EST/cDNA que no se agrupa en TAs es incluida como "singleton". Los "singletons" corresponderán a los números de acceso de GenBank si son depositados allí. Las identificaciones de los TA de CENICAFE son de la forma Número_de_TA/taxonID, donde el número de TA es una identificación consecutiva y taxonID representa la identificación de la base de datos taxon del NCBI.

Para proporcionar anotación para los TAs, cada TA/singleton fue alineado a una versión enmascarada de la base de datos UniProt/Uniref100. Las alineaciones requirieron tener por lo menos 20% de identidad y 20% de cubrimiento de secuencia. La anotación para la proteína con la mejor alineación a cada TA o singleton se utilizó como la anotación para esa secuencia. Adicionalmente, la orientación relativa de cada TA/singleton a la mejor secuencia de proteína se utilizó para determinar la orientación de cada TA/singleton. Algunas secuencias no alinearon con ninguna secuencia de las bases de datos de

proteínas con los criterios de calidad utilizados por lo que esas secuencias no tienen ni anotación funcional ni orientación. Cada vez que se reciben datos de secuencia de nuevas librerías se procede a realizar un nuevo ensamblaje de esa especie en particular, aunque las versiones pasadas de ensamblajes siguen siendo almacenadas en la base de datos.

Las secuencias ensambladas de *C. arabica* fueron utilizadas para análisis BLAST de homología con secuencias de especies de la familia Solanaceae, cercana filogenéticamente a la familia del café (Tabla 3). El mayor porcentaje de secuencias homólogas se obtuvo con la especie *Solanum lycopersicum* (55%) y se obtuvieron porcentajes de similaridad muy variables entre todas las especies. En esta tabla se puede observar que los porcentajes de homología entre conjuntos de secuencias de diferentes especies son muy dependientes del número de secuencias analizadas; cuando se analiza un número pequeño de secuencias los porcentajes son bajos y cuando se analiza un número de secuencias alto este número aumenta. Es aconsejable analizar un número de secuencias similar entre dos conjuntos de secuencias de dos especies diferentes para poder tener una idea real sobre su relación. Un análisis más completo de homología, aunque con un set más pequeño de secuencias de *C. arabica* se publicó recientemente (Montoya *et al.* 2006).

Análisis de secuencias BES (BAC-end Sequences)

La construcción y secuenciación de la librería BAC de *C. arabica* var. Caturra se realizó en la Universidad de Arizona por parte del grupo liderado por el Dr. Rod Wing. Se secuenciaron un total de 86.782 BES de los cuales se seleccionaron por calidad (phred>20) un total de 81.444; el porcentaje de secuencias de buena calidad fue por tanto de 94%. En este grupo se identificaron adicionalmente un total de 488 secuencias de organelos (mitocondria y cloroplasto) por lo que la contaminación de la librería con este tipo de secuencias es despreciable (<1%).

El número final de BES después de estos filtros de limpieza fue de 80.056 secuencias con un tamaño promedio de 619bp. De estas secuencias un total de 38.199 corresponden a clones que tienen la secuencia de los 2 extremos BES y 3660 corresponden a clones que solo poseen un extremo BES secuenciado. Se identificaron un total de 2169 secuencias BES que poseen microsatélites de 2-5 unidades repetitivas, predominando los dinucleótidos con un 57% del total de microsatélites identificados. Estos microsatélites están siendo utilizados en la construcción del mapa molecular de *C. arabica*.

Tabla 1. Estadísticas de los ensamblajes de secuencias de ESTs depositadas en las bases de datos de bioinformática a mayo del 2007.

	N° de Contigs	N° de Singletons	N° de Unigenes	Promedio Longitud de Contigs	Máxima Longitud de Contigs	Mínima Longitud de Contigs	Promedio Longitud de Singletons	Máxima Longitud de Singletons	Mínima Longitud de Singletons	ESTs/C ontig
<i>Coffea arabica</i>	8709	11802	20511	950 bp	3943 bp	102 bp	600 bp	1021 bp	101 bp	5
<i>Coffea kapakata</i>	496	1551	2047	741 bp	1786 bp	144 bp	579 bp	883 bp	101 bp	5
<i>Coffea liberica</i>	3231	7551	10782	1015 bp	3478 bp	102 bp	730 bp	1007 bp	101 bp	3
<i>Beauveria bassiana</i> ¹	2297	4119	6416	733 bp	2549 bp	110 bp	437 bp	779 bp	101 bp	5
<i>Hypothenemus hampei</i>	216	698	914	591 bp	1614 bp	156 bp	411 bp	806 bp	101 bp	7

1. Parte de las secuencias de *B. bassiana* fue obtenida en la Universidad de Florida y parte en Cenicafé.

Tabla 2. Número de secuencias depositadas en la base de datos de marcadores moleculares, marcadores que han sido polimórficos en la especie *C. arabica* y marcadores que han sido utilizados en la construcción del mapa de la especie *C. arabica*.

Organismo	Marcadores Polimórficos	Marcadores Mapeados	Número de secuencias depositadas
<i>Coffea arabica</i>	158	86	3950
<i>Coffea canephora</i>	100	36	986
<i>Coffea kapakata</i>	2	2	64
<i>Hedyotis spp.</i>	12	-	326
Total	272	124	5478

Tabla 3. Análisis de homología de secuencias de ESTs de *C. arabica* con secuencias de especies de la familia Solanaceae. El análisis se realizó con el programa BLAST con un valor $E=1e^{-}$

	N° de secuencias	Hits	%
<i>Capsicum annum</i>	13176	3888	36%
<i>Hedyotis centranthoides</i>	4311	2097	19%
<i>Solanum lycopersicum</i>	45585	5942	55%
<i>Solanum pennellii</i>	3370	1327	12%
<i>Nicotiana sylvestris</i>	6773	2549	24%
<i>Nicotiana tabacum</i>	38612	5494	51%
<i>Solanum chacoense</i>	5450	2796	26%
<i>Solanum habrochaites</i>	3553	2214	21%

Bases de Datos

En las Tablas 1 y 2 se describen detalles del número de secuencias de EST's y microsatélites respectivamente, depositadas en las bases de datos que se han desarrollado en Cenicafé a mayo del 2007. En este proyecto se implementaron bajo entorno Web bases de datos con la información generada en el proyecto de estudio del genoma del café y se espera que en el futuro el sistema creado permita implementar otras bases de datos. Las bases de datos que se han implementado hasta la fecha son:

Marcadores moleculares: esta base de datos contiene la información generada en el proyecto de identificación y utilización de marcadores microsatélites y otros tipos de marcadores para la construcción de un mapa molecular de café. En la actualidad esta base de datos contiene un total de 5.478 registros.

ESTs: esta base de datos contiene la información de los ESTs (Expressed Sequenced Tags) que son secuencias parciales de genes que se han generado en café, broca y *B. bassiana*. Dentro de las tablas que esta base de datos

contiene se encuentran los resultados de los ensamblajes de ESTs, información detallada del proceso de limpieza de las secuencias y la información de las librerías de las que provienen los ESTs. La base de datos está compuesta por las tablas Library, Raw_Clones, Transcripts, Contigs_Link, Contigs, Annotation, Analysis_Annotation, Contamination, Releases, Contig_History.

Las estadísticas de las secuencias que actualmente están depositadas en las bases de datos de bioinformática se detallan en la Tabla 1. La especie con el mayor número de secuencias depositadas en las bases de datos de EST's es *C. arabica*, aunque al hacer un cálculo del porcentaje del genoma (1400 Mbp) de esta especie que ha sido secuenciado solamente está entre el 5-6%; sin embargo, aunque la especie *B. bassiana* tiene un número mucho menor de secuencias en la base de datos el porcentaje del genoma que ha sido secuenciado es de alrededor del 25%, debido a su pequeño tamaño de genoma (aprox. 12-20 Mbp). Es de anotar que la calidad de las librerías construidas ha mejorado notablemente en los últimos años así como la calidad en la secuenciación; estas mejoras tecnológicas han redundado notoriamente en el aumento de secuencias de buena calidad y de mayor longitud depositadas en las bases de datos (datos no mostrados). Algunas de las librerías de cDNA recientemente secuenciadas fueron construidas por la compañía Evrogen (Moscú, Rusia) a través de una novedosa técnica de normalización, la cual permitió obtener librerías con menor redundancia y por tanto mayores tasas de descubrimiento de genes.

Conclusiones

Fue posible implementar un sistema de bases de datos bajo entorno Web para el almacenamiento de datos de secuencia de varias especies de café, la broca y el hongo *B. bassiana*, basado principalmente en herramientas GNU-GPL.

El sistema es de fácil acceso y utilización por parte de los investigadores del proyecto de estudio de genoma desde cualquier computador de Cenicafé a través de un sistema de autenticación que permite mantener la seguridad de los datos.

El sistema desarrollado permite un amplio crecimiento y el acceso a la información actualizada de cada especie estudiada en forma rápida y eficiente.

Agradecimientos

A la Dra. Robin Buell y su equipo de bioinformática en TIGR por su colaboración en todas las etapas del trabajo y

al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la co-financiación de este estudio.

Referencias

Ewing B, Hillier L, Wendl M, Green P. 1998. Basecalling of automated sequencer traces using phred. I. Accuracy assessment. *Genome Research* 8: 175-185.

Huang X.; Madan A. 1999. CAP3: A DNA Sequence Assembly Program. *Genome Research* 9: 868-877.

Lin C, Mueller LA, Mc Carthy J, Crouzillat D, Pétiard V, Tanksley SD. 2005. Coffee and tomato share common gene repertoires as revealed by deep sequencing of seed and cherry transcripts. *Theor Appl Genet.* 112: 114-130.

Montoya, G.; Cristancho, M.A.; Moncada M.P. 2006. Análisis de secuencias de genes de *Coffea arabica* var. Caturra. *Cenicafe* 57: 79-87.

Pertea G, Xiaoqiu Huang, Feng Liang, Valentin Antonescu, Razvan Sultana, Svetlana Karamycheva, Yuandan Lee, Joseph White, Foo Cheung, Babak Parvizi, Jennifer Tsai, John Quackenbush. 2003. TIGR Gene Indices clustering tools (TGICL): a software system for fast clustering of large EST datasets. *Bioinformatics* 19: 651-652.

Samson, N., Michael G. Bausher, Seung-Bum Lee, Robert K. Jansen, Henry Daniell 2007. The complete nucleotide sequence of the coffee (*Coffea arabica* L.) chloroplast genome: organization and implications for biotechnology and phylogenetic relationships amongst angiosperms *Plant Biotechnology Journal* 5 (2): 339-353.

Smit, AFA, Hubley, R & Green, P. *RepeatMasker Open-3.0.* 1996-2004 <<http://www.repeatmasker.org>>.

Teufel, A, Markus Krupp, Arndt Weinmann, Peter R. Galle. 2006. Current bioinformatics tools in genomic biomedical research (Review). *International Journal of Molecular Medicine* 17: 967-973.

Thiel T, Michalek W, Varshney RK, Graner A. 2003. Exploiting EST databases for the development and characterization of gene-derived SSR-markers in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Theor Appl Genet* 106: 411-422.

Zhang Z., Schwartz S., Wagner L., & Miller W. 2000. A greedy algorithm for aligning DNA sequences. *J Comput Biol* 2000; 7(1-2): 203-214.

Recibido: octubre 30 de 2007.

Aceptado para su publicación: noviembre 21 de 2008.

MONILOFITOS Y LICOFITOS DE LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ (CALDAS, COLOMBIA). CLAVE PARA GÉNEROS Y CATÁLOGO DE LAS ESPECIES

Por

David Sanín¹, Luis Miguel Álvarez Mejía¹, Julio César Mancera Santa², Natalia Castaño Rubiano² & Germán González Ocampo²

Resumen

Sanín, D., L.M. Álvarez Mejía, J.C. Mancera Santa, N. Castaño Rubiano & G. González Ocampo: Monilofitos y licofitos de la cuenca del río Chinchiná (Caldas, Colombia). Clave para géneros y catálogo de las especies. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(124): 331-352, 2008. ISSN 0370-3908.

En Colombia se registran alrededor de 1600 especies de helechos y afines, reunidas en 33 familias y 130 géneros, donde la zona Andina alberga la mayor concentración de especies. Sin embargo, de forma contrastante, la Cordillera Central colombiana es la menos estudiada y la más alterada. Este estudio se enfocó en caracterizar la flora pteridológica de la Cuenca del Río Chinchiná, ubicada en la vertiente occidental de la Cordillera Central Andina. Se evaluaron 25 localidades, donde se recolectaron todos los Monilofitos y Licofitos en estado reproductivo, posteriormente se determinaron por medio de literatura especializada y la comparación con ejemplares de los herbarios COL y FAUC. Se registran 155 especies y una variedad, distribuidas en 59 géneros y 20 familias. Los taxones con mayor riqueza son Polypodiaceae (11 géneros/28 especies), Dryopteridaceae (10/28), Pteridaceae (7/20), Aspleniaceae (1/11) e Hymenophyllaceae (2/10). Esto representa cerca del 9.6% de las especies registradas para Colombia. El hábito terrestre presenta la mayor diversidad (62% /, 97 especies), seguido del epífito (30% /, 46), arbóreo (7% /, 10) y finalmente el hemiepífito (0,6% /, 1). *Thelypteris gardneriana* representa el tercer registro para Colombia, asimismo el 35% de los registros (53 especies), son nuevos para Caldas. Se presenta una clave para los géneros y el catálogo de las especies.

Palabras clave: cuenca del río Chinchiná, flora de Caldas, monilofitos y licofitos, catálogo y clave de géneros.

¹ Herbario Universidad de Caldas (FAUC). Grupo de Investigación en Biodiversidad y Recursos Fitogenéticos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Calle 65 No. 26-10, Manizales, Caldas, Colombia, A.A. 275, Correo electrónico: david.sanin@ucaldas.edu.co

² Corporación Flora de Caldas, Calle 10 No. 7-32, Manizales, Caldas, Colombia, Correo electrónico: corporacionfloradecaldas@yahoo.com

Abstract

In Colombia are registered about 1600 species of ferns and allies, distributed in 33 families and 130 genus, were the Andean zone is the most diverse. Nevertheless, this cordillera is the less studied, and the most disturbed. This document is focused to characterized the ferns and allies flora in the basin of the Chinchiná River, which is located on the western slope of the Andean Central Cordillera, Evaluated 25 sites of sampling, where all the Monilophytes and Lycophytes were collected in fertile exemplary looking for, the exemplars are determinate used specific bibliography and be compared with material of the Herbarium COL and FAUC. 155 species, and one variety, distributed in 59 genera and 20 families were registered; the families more diverse were Polypodiaceae (11 genera/28 species), Dryopteridaceae (10/28), Pteridaceae (7/20), Aspleniaceae (1/11), and Hymenophyllaceae (2/10). This represents near 9.6% of the species registered for Colombia. The terrestrial habit, displays the greater percentage of species (62% /, 97 species), followed of epiphytic (30% /, 46), arboreal (7% /, 10) and hemi-epiphytic (0.6% /, 1). *Thelypteris gardneriana* represents the third registry for Colombia, also 35% of the registries (53 species), are new for the Department of Caldas. A key for the genera and the catalogue of the species is presented.

Key words: Chinchiná Basin River, Monilophytes y Lycophytes, Flora of Caldas, key for the genera and catalogue.

Introducción

Los Monilofitos y Licofitos (*sensu* Smith *et al.*, (2006)) son importantes componentes de la flora vascular del planeta (Moran 2001, Schneider *et al.*, 2004), ya que se estiman entre 10.000 y 12.000 especies (Tryon & Tryon 1982, Mora-O. 1992, Moran 2001, Pryer *et al.*, 2004, Schneider *et al.*, 2004), y representan cerca del 10% del total de cualquier flora vascular (Moran 2001).

En Colombia se registran alrededor de 1600 especies reunidas en 33 familias y 130 géneros (Murillo *et al.*, 2004). La zona Andina alberga la mayor concentración de especies; sin embargo, de forma contrastante la cordillera Central colombiana es la menos estudiada (Murillo *et al.*, 2004) y la de mayor alteración antrópica (Giraldo-Cañas 1997). Allí, sobresalen algunos estudios florísticos realizados en la zona centro de la cordillera Central (Fraume *et al.* 1990, Galeano-P. 1994, Rangel-Ch. 1995, Rangel-Ch. *et al.* 1995, Díaz-Piedrahita 1996, Vargas 2002, Orrego *et al.* 2004, Sanín *et al.* 2006, Álvarez-M. *et al.* 2007). Si bien, estos trabajos registran especies de Monilophyta y Lycophyta, no son específicos hacia la realización de una flora local para estos grupos.

La cuenca del Río Chinchiná presenta gran alteración de sus áreas silvestres, ya que es la zona más densamente poblada del departamento de Caldas, donde más de 500.000 personas demandan bienes y servicios ambientales (Corpocaldas 2000); además, los modelos de uso y explotación del suelo han generado sistemas de producción agropecuaria, no compatibles con la conservación de la biodiversidad.

Esto ha motivado el estudio sistemático de los Monilofitos y Licofitos de la cuenca del Río Chinchiná, brindando bases taxonómicas y ecológicas para la futura comprensión de su diversidad, y la importante relación entre estos recursos biológicos y el desarrollo integral de la región.

Área de estudio

La cuenca del Río Chinchiná se localiza en la región Centro-Sur del departamento de Caldas, sobre la vertiente occidental de la cordillera Central. Comprende el área total de los municipios de Manizales y Villamaría, y parcialmente a Palestina, Neira y Chinchiná; asimismo todas las cabeceras urbanas, a excepción de Neira, se encuentran en la cuenca (Corpocaldas 2000) (Figura 1).

Esta cuenca se extiende desde los 05° 07' 05.3" Norte y los 75° 40' 10.3" Oeste, a 800 m en la desembocadura del río Chinchiná al río Cauca, hasta los 05° 03' 30" Norte y los 75° 23' 03" Oeste, a 5200 m en la Laguna Negra, dentro del Parque Nacional Natural Los Nevados (Corpocaldas 2000). La cuenca del río Chinchiná hace parte de la Macrocuenca del Río Cauca, sus principales afluentes son los ríos Claro y Guacaica, los cuales a su vez reciben numerosos afluentes (Corpocaldas-Aguas de Manizales 1999). Su área total es de 113.264 ha, de las cuales la actividad pecuaria, con cultivos de pastos, cubren el 40%. El uso forestal, con cultivos de especies en su mayoría exóticas, abarca el 28% del área y por último el uso agrícola cubre el 21% de la cuenca (Corpocaldas 2000). La mayoría de los bosques naturales han sido aprovechados en forma selectiva, extrayendo las especies de lento crecimiento y de mayor valor comercial (Corpocaldas 2000).

Los suelos se originan en procesos volcánicos, donde las laderas fueron cubiertas por piroclastos Andesíticos del Cuaternario tardío (*Andisoles*), según el sistema FAO/UNESCO (Vis 1995). Éstos son ricos en materia orgánica (altos contenidos de alofano) y humíferos, con regímenes de humedad desde údico hasta ácuico (Thouret & Faivre 1989).

El clima en el área es típicamente (ínter) tropical, caracterizado por pequeñas fluctuaciones de la temperatura interanual, pero grandes fluctuaciones diarias y una distribución bimodal de la lluvia durante el año. Esta área está influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZIT) y por el carácter montañoso de la región (Witte 1995). La precipitación media anual está entre 1800-2200 mm/año con máximas en los meses de abril-mayo y agosto-noviembre, y generalmente la parte baja de la cuenca es más lluviosa que la alta (Corpocaldas 2001). La temperatura está determinada por la altitud, por ello existen importantes disimetrías de orden espacial y temporal, es así como la temperatura mínima está por debajo de -3°C en la zona alta y la temperatura máxima registrada en Santágueda es de $29,2^{\circ}\text{C}$ a 1000 m. Por otro lado, se registran como los meses más fríos a septiembre, octubre, noviembre y diciembre, mientras los meses más cálidos son febrero, marzo, abril y mayo (Corpocaldas 2001).

Cuatrecasas (1958), define las siguientes formaciones vegetales: Selva Pluvial (0-1000) Selva Subandina (1000-2400), Selva Andina (2400-3800), Páramo (3800-4700), de estas, las tres últimas son mayormente representadas en la cuenca, ya que la zona de Selva Pluvial únicamente presenta áreas a partir de los 800 m. La vegetación de las formaciones vegetales es ampliamente descrita por Cuatrecasas (1958) y complementada por Rangel-Ch. *et al.* (2003) para los ecosistemas de Selva Subandina, Cleef *et al.* (2003) para la Selva Andina, y Salamanca *et al.* (2003), para los ecosistemas de páramo localizados en la región central de la cordillera Central, específicamente los ubicados sobre el Transecto Ecoandes (van der Hammen & dos Santos 2003).

Materiales y métodos

A partir de información cartográfica (Corpocaldas 2001), se seleccionaron 25 sitios de muestreo (Tabla 1, Figura 2) con énfasis en las áreas de reserva forestal, relictos de bosque, bosques de galería y rastrojos de bordes y riberas de los afluentes principales. Se realizaron recorridos alrededor de estas zonas, recolectando muestras independientemente de su estado fenológico. Los ejemplares fueron procesados según los métodos de herborización estándar (Rangel-Ch. & Velázquez 1997).

Tabla 1. Localidades muestreadas en la cuenca del Río Chinchiná.

Sitio	Altura m	Zona de vida
1. Torre IV, Subpáramo (Manizales)	3731	Selva Andina-Páramo
2. San Carlos (Villamaría)	3677	Selva Andina-Páramo
3. La Gruta (Villamaría)	3393	Selva Andina
4. La Fe, (Vertiente Occidental, Manizales)	2800	Selva Andina
5. Tesorito (Manizales)	2700	Selva Andina
6. Torre IV, Bosque Montano (Manizales)	2600	Selva Andina
7. San Juan (Neira)	2530	Selva Andina
8. La Fe (Vertiente Oriental, Manizales)	2500	Selva Andina
9. Río Blanco (Manizales)	2500	Selva Andina
10. Parnaso (Villamaría)	2302	Selva subandina
11. Cementos Caldas (Neira)	2203	Selva subandina
12. Berlín (Neira)	2186	Selva subandina
13. Caracoles (Manizales)	2100	Selva subandina
14. Monte Verde (Manizales)	1860	Selva subandina
15. Vda. Java la Siria (Manizales-Chinchiná)	1804	Selva subandina
16. Águila (Manizales)	1780	Selva subandina
17. Alto Lisboa (Neira)	1733	Selva subandina
18. Rumazón (Neira)	1480	Selva subandina
19. Plan alto (Chinchiná)	1480	Selva subandina
20. Violeta (Manizales-Chinchiná)	1472	Selva subandina
21. Romelia (Palestina)	1138	Selva subandina
22. Salto del Cacique (Palestina)	1138	Selva subandina
23. Montelindo (Palestina)	1064	Selva subandina
24. Costa Rica (Palestina)	1051	Selva subandina
25. Km. 41 (Palestina)	1012	Selva subandina

Convenciones: Según Cuatrecasas (1958), Selva subandina (desde 1000-2400m), Selva Andina (2400-3800m), Páramo (3800-4700m).

Todos los exicados están depositados en el Herbario de la Universidad de Caldas (FAUC), bajo la serie de los autores. Los duplicados se enviaron a los herbarios: Nacional Colombiano (COL), Universidad de Antioquia (HUA) y Universidad del Quindío (HUQ) (Holmgren *et al.* 1981). La determinación taxonómica se realizó por medio de literatura especializada: Arbeláez (1996), Lellingner (1972, 1988, 1989, 1994), Mickel & Beitel (1988), Murillo (1968, 1988), Murillo & Harker (1990), Murillo-A. & Murillo (1999), Murillo & Murillo-A. (2004), Moran (2001), Moran & Riba

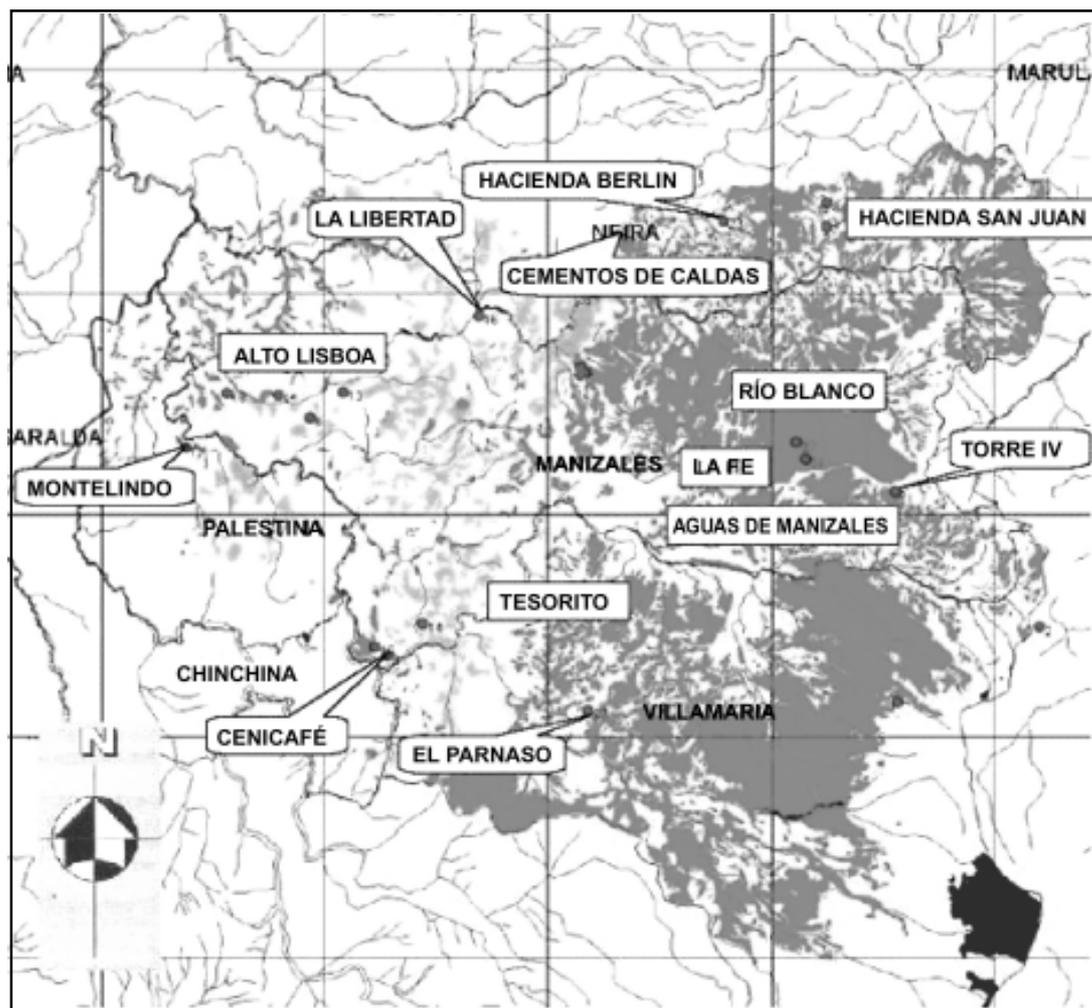


Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo en la Cuenca del Río Chinchiná, Caldas, Colombia.

(1995), **Smith** (1982, 1992, 1993), **Smith & Moran** (1992), **Steyermark et al.** (1995), **Stolze** (1986), **Tryon** (1976, 1986), **Tryon & Stolze** (1989a, 1989b, 1991), y la comparación con ejemplares de los Herbarios FAUC y COL. En la presentación del catálogo se sigue a **Smith et al.** (2006) para Monilophyta, y a **Moran & Riba** (1995) para Lycophyta. La correcta escritura de los nombres científicos y su actualización nomenclatural fue consultada en la base de datos **W³TROPICOS** del *Missouri Botanical Garden* y la base **IPNI** (*The International Plant Names Index*), del *Royal Botanical Garden (KEW)-The Harvard University Herbaria* y *Australian National Herbarium*.

Resultados

Se registraron 155 especies y una variedad (145 especies y una variedad para Monilophyta y 9 para Lycophyta),

distribuidas en 59 géneros (55 y 3) y 20 familias (18 y 2) respectivamente (Tabla 2). Las familias con mayor número de especies son Polypodiaceae (11 géneros/28 especies), seguida de Dryopteridaceae (10/28), Pteridaceae (7/20), Aspleniaceae (1/11) e Hymenophyllaceae (2/10) para Monilophyta. Selaginellaceae presentó el mayor registro de especies en Lycophyta con cinco taxones (Tabla 2 y 3).

Entre los géneros con más especies (Tabla 4), se destacan *Elaphoglossum*, y *Asplenium*, luego *Hymenophyllum*, *Thelypteris*, *Pteris* y *Cyathea*. Mientras los géneros *Selaginella* y *Huperzia* con cinco y tres especies respectivamente, presentan la mayor riqueza en Lycophyta. La forma de vida más frecuente son los helechos terrestres (97 especies), en segundo lugar los epífitos (46), los arbóreos reúnen 11 especies y solo una es hemiepífita (Tabla 5, Figura 3).

Tabla 2. Catálogo de Monilophyta y Lycophyta de la Cuenca del río Chinchiná, Caldas, Colombia.

MONILOPHYTA				
Taxon	Localidad	Altitud	Forma de Crecimiento	Colección
ANEMIACEAE				
<i>Anemia phyllitidis</i> (L.) Sw.	Plan Alto, Chinchiná	1480	Hierba terrestre	DS 531
ASPLENIACEAE				
<i>Asplenium alatum</i> Humb. et Bonpl. ex Willd.	Cementos Caldas, Neira	2100	Hierba epífita	DS 667
* <i>A. auritum</i> Sw.	Berlín, Neira	2180	Hierba terrestre	DS 722, 725
<i>A. castaneum</i> Schldl. & Cham.	San Carlos, Villa María	3677	Hierba terrestre	DS 861
<i>A. cuspidatum</i> Lamb.	San Juan, Neira	2530	Hierba terrestre	DS 765
<i>A. harpeodes</i> Kunze.	Torre IV, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 925
<i>A. hastatum</i> Klotzsch ex Kunze	El Parnaso, Villa María	2300	Hierba terrestre	DS 641
<i>A. monanthes</i> L.	San Juan, Neira	2530	Hierba terrestre	DS 802
<i>A. myriophyllum</i> (Sw.) C. Presl.	Torre IV, Manizales	2600	Hierba terrestre	M. Alvear 446 (FAUC, COL)
<i>A. pteropus</i> Kaulf.	La Violeta-El Rosario, Manizales	1472	Hierba terrestre	DS 576
<i>A. radicans</i> L.	Berlín, Neira	2180	Hierba terrestre	DS 724
<i>A. rutaceum</i> (Willd.) Mett.	Monteleón, Manizales	2150	Hierba terrestre	M. de Fraume, et al. 259 (FAUC).
BLECHNACEAE				
<i>Blechnum binervatum</i> subsp. <i>fragile</i> (Liebm.) R. M. Tryon & R. G. Stolze.	El Parnaso, Villamaría	2300	Hierba epífita.	DS 631
<i>B. cordatum</i> (Desv.) Hieron.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 150
<i>B. fraxineum</i> Willd.	Salto del Cacique- Santágueda, Palestina	1050	Hierba terrestre	DS 530
<i>B. occidentale</i> L.	Montelindo, Santágueda	1050	Hierba terrestre	DS 518
CYATHEACEAE				
° <i>Alsophila erinacea</i> (H. Karst.) D. S. Conant	San Juan, Neira	2530	Helecho arborescente	DS 754
° <i>A. incana</i> (H. Karst.) D. S. Conant	Monte Verde, Manizales	1804	Helecho arborescente	DS 595
<i>Cnemidaria horrida</i> (L.) C. Presl	Jardín Botánico, Manizales	2150	Helecho arborescente	DS 436
<i>Cyathea caracasana</i> (Klotzsch) Domin	El Parnaso, Villa María	2300	Helecho arborescente	DS 630
° <i>C. caracasana</i> var. <i>maxoni</i> (Underw) R.M.Tryon.	La Gruta, Villa María	3393	Helecho arborescente	DS 813
° <i>C. microdonta</i> (Desv.) Domin	La Cabaña, Manizales	1138	Helecho arborescente	DS 560
° <i>C. pallescens</i> (Sodirol) Domin	La Gruta, Villa María	3393	Helecho arborescente	DS 812
° <i>C. poeppigii</i> (Hook.) Domin	Km 41, Manizales	1012	Helecho arborescente	DS 608
° <i>C. tryonorum</i> (Riba) Lellinger	San Carlos, Villa María	3677	Helecho arborescente	DS 862
<i>Sphaeropteris quinduiensis</i> (H. Karst.) R. M. Tryon.	Río Blanco, Manizales	2600	Helecho arborescente	DS 1119

Continuación Tabla 2.

MONILOPHYTA				
Taxon	Localidad	Altitud	Forma de Crecimiento	Colección
DENNSTAEDTIACEAE				
° <i>Dennstaedtia arborescens</i> (Willd.) Ekman ex Maxon	Río Blanco, Manizales	2590	Hierba terrestre	DS 1146
<i>D. globulifera</i> (Poir.) Hieron.	Monte Verde, Manizales	1804	Hierba terrestre	DS 606
<i>Histopteris incisa</i> (Thunb.) J. Sm.	Vía Termales, Villa María	3780	Hierba terrestre	M. T. Murillo 909 (COL)
<i>Hypolepis bogotensis</i> Karst. Mett.	San Carlos, Villa María	3677	Hierba terrestre	DS 835
° <i>H. hostilis</i> (Kunze) C. Presl	Montelindo, Palestina	1050	Hierba terrestre	DS 1032
<i>Pteridium arachnoideum</i> (Kaulf.) Maxon	Tablazo, Manizales	2000	Hierba terrestre	M. de Fraume 13 (FAUC)
DICKSONIACEAE				
* <i>Dicksonia sellowiana</i> Hook.	Termales del Ruíz, Villa María	3677	Helecho arborescente	DS 870
<i>Lophosoria quadripinnata</i> (J. F. Gmel.) C. Chr.	Vía Termales del Ruíz, Villa María	3780	Hierba terrestre	DS 871
DRYOPTERIDACEAE				
** <i>Arachniodes denticulata</i> (Sw.) Ching	Río Blanco, Manizales	2500	Hierba terrestre	DS 86
° <i>Ctenitis ampla</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Ching	Salto del Cacique, Palestina	1050	Hierba terrestre	DS 529
<i>Cyrtomium dubium</i> (H. Karst.) R. M. Tryon & A. F. Tryon	Río Blanco, Manizales	2147	Hierba terrestre	DS 1147
<i>Dryopteris walllichiana</i> (Spreng.) Hyl.	Río Blanco, Manizales	3550	Hierba terrestre	DS 1094
<i>Elaphoglossum castaneum</i> (Baker) Diels	San Carlos, Villa María	3677	Hierba terrestre	DS 857
<i>E. cuspidatum</i> (Willd.) T. Moore	Berlín, Neira	2180	Hierba epífita	DS 737
<i>E. dendricolum</i> (Baker) H. Christ	La Gruta, Villa María	3393	Hierba terrestre	DS 877
<i>E. engelii</i> (H. Karst.) H. Christ	Torre IV, Manizales	3800	Hierba terrestre	DS 698
° <i>E. eximium</i> (Mett.) H. Christ	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 115
° <i>E. funkii</i> (Fée) T. Moore	Torre IV, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 929
° <i>E. glossophyllum</i> Hieron.	San Carlos, Villa María	3677	Hierba terrestre	DS 859
° <i>E. hirtum</i> (Sw.) C. Chr.	La Gruta, Villa María	3393	Hierba terrestre	DS 888
° <i>E. aff. hoffmannii</i> (Mett. ex Kuhn) H. Christ	Torre IV, Manizales	3800	Hierba epífita	DS 691
<i>E. mathewsii</i> (Fée) Moore	Torre IV, Manizales	3800	Hierba terrestre	DS 697
<i>E. minutum</i> (Fée) T. Moore	La Gruta, Villa María	3393	Hierba terrestre	DS 882
<i>E. muscosum</i> (Sw.) T. Moore	Torre IV, Manizales	3800	Hierba terrestre	DS 698
° <i>E. piloselloides</i> (C. Presl) T. Moore	Río Blanco, Manizales	2700	Hierba terrestre	DS 116
° <i>E. rimbachii</i> (Sodiño) H. Christ	San Carlos, Villa María	3677	Hierba epífita	DS 833
* <i>E. tectum</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) T. Moore	San Juan, Neira	2530	Hierba terrestre	DS 758
<i>E. tenuiculum</i> (Fée) T. Moore ex C. Chr.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 134
<i>Lastreopsis effusa</i> (Sw.) Tindale	Plan Alto, Chinchiná	1480	Hierba terrestre	DS 549

Continuación Tabla 2.

MONILOPHYTA				
Taxon	Localidad	Altitud	Forma de Crecimiento	Colección
<i>Megalastrum subincisum</i> (Willd.) A. R. Sm. & R. C. Moran	San Juan, Neira	2530	Hierba terrestre	DS 796
° <i>M. pulverulentum</i> (Poir.) A. R. Sm. & R. C. Moran	Río Blanco, Manizales	2500	Hierba terrestre	DS 1044
° <i>Polybotrya osmundacea</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba hemiepífita	DS 1067
<i>Polystichum lehmannii</i> Hieron	San Carlos, Villamaría	3677	Hierba terrestre	DS 829
<i>P. muricatum</i> (L.) Fée	La Violeta-El Rosario, Manizales	1472	Hierba terrestre	DS 591
<i>P. platyphyllum</i> (Willd.) C. Presl	Monte Verde, Manizales	1804	Hierba terrestre	DS 605
<i>P. polyphyllum</i> Presl.	La Gruta, Villamaría	3393	Hierba terrestre	DS 887
EQUISETACEAE				
<i>Equisetum bogotense</i> Kunth	El Parnaso, Villamaría	2300	Hierba terrestre	DS 642
° <i>E. giganteum</i> L.	Jardín Botánico, Manizales	2150	Hierba terrestre	DS 1104
GLEICHENIACEAE				
<i>Diplopterygium bancroftii</i> (Hook) A. R. Sm.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 1365
<i>Dicranopteris pectinata</i> (Willd.) Underw.	Cuchilla del Salado, Manizales	1850	Hierba terrestre	J. Gomes & M. Builes. s.n. (FAUC)
<i>Sticherus bifidus</i> (Willd.) Ching	Villa María	1850	Hierba terrestre	A. M. Ríos, et al. 8. (FAUC)
HYMENOPHYLLACEAE				
<i>Hymenophyllum elegantulum</i> Bosch	La Gruta, Villamaría	3393	Hierba epífita	DS 865
° <i>H. cf. farallonense</i> Hieron.	Torre IV, Manizales	3800	Hierba epífita	DS 938
° <i>H. fragile</i> (Hedw.) C.V. Morton	Berlín, Neira	2180	Hierba epífita	DS 738
° <i>H. fucoides</i> (Sw.) Sw.	Torre IV, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 935
* <i>H. karstenianum</i> J. W. Sturm	Torre IV, Manizales	3800	Hierba epífita	DS 690
° <i>H. lanatum</i> Fée	Río Blanco, Manizales	2700	Hierba epífita	DS 92
° <i>H. lindenii</i> Hook.	Torre IV, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 927
<i>H. myriocarpum</i> Hook.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 102
° <i>H. trichophyllum</i> Kunth	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 101
° <i>Trichomanes hymenoides</i> Hedw.	El Parnaso, Villa María	2300	Hierba epífita	DS 627
LOMARIOPSIDACEAE				
<i>Nephrolepis pectinata</i> (Willd.) Schott.	El Parnaso, Villa María	2300	Hierba terrestre	DS 648
MARATTIACEAE				
<i>Danaea moritziana</i> C. Presl	Berlín, Neira	2180	Hierba terrestre	DS 748
<i>Marattia laevis</i> Sm.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 920
PLAGIOGYRIACEAE				
<i>Plagiogyria semicordata</i> (K. Presl) H. Christ	Vía Manizales-Termas del Ruíz	3000-3500	Hierba terrestre	DS 1281

Continuación Tabla 2.

MONILOPHYTA				
Taxon	Localidad	Altitud	Forma de Crecimiento	Colección
POLYPODIACEAE				
° <i>Campyloneurum amphostenon</i> (Kunze ex Klotzsch) Fée.	Vía Termales, Villa María	3780	Hierba epífita	DS 984
<i>C. angustifolium</i> (Sw.) Fée	Monte Verde, Manizales	1804	Hierba epífita	DS 600
<i>C. phyllitidis</i> (L.) C. Presl	Montelindo, Palestina	1050	Hierba epífita	DS 500
<i>C. repens</i> (Aubl.) C. Presl	Tesorito, Manizales	2300	Hierba epífita	DS 474
<i>C. vexatum</i> (Eaton) Ching	Torre IV, Manizales	3800	Hierba epífita	DS 685
* <i>Ceradenia mayoris</i> (Rosenst.) L. E. Bishop	Torre IV, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 699
° <i>Melpomene firma</i> (J. Sm.) A. R. Sm. & R. C. Moran	Río Blanco, Manizales	2500	Hierba epífita	DS 121
<i>M. flabeliformis</i> (Poir.) A. R. Sm. & R. C. Moran	San Carlos, Villamaría	3677	Hierba terrestre	DS 845
<i>M. monoliformis</i> (Lag. ex Sw) A. R. Sm. & R. C. Moran	Torre IV, Manizales	3800	Hierba terrestre	DS 689
<i>Microgramma percussa</i> (Cav.) de la Sota	Cementos Caldas, Neira	2100	Hierba epífita	DS 658
° <i>Micropolypodium</i> sp.	Río Blanco, Manizales	2590	Hierba epífita	DS 1063
<i>Niphidium albopunctatissimum</i> Lellinger	Torre IV, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 926
° <i>Pecluma divaricata</i> (E. Fourn.) Mickel & Beitel	Torre IV, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 928
<i>P. eurybasis</i> (C. Chr.) M. G. Price	San Juan, Neira	2530	Hierba epífita	DS 804
° <i>P. hygrometrica</i> (Splitg.) M.G. Price	Salto del Cacique, Palestina	1050	Hierba epífita	DS 525
<i>Pleopeltis astrolepis</i> (Liebm.) E. Fourn.	Montelindo, Palestina	1050	Hierba epífita	DS 509
<i>P. macrocarpa</i> (Bory ex Willd.) Kaulf.	La Fé, Manizales	2800	Hierba epífita	DS 955
<i>Polypodium monosorum</i> Desv.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 3
<i>P. murorum</i> Hook.	San Carlos, Villa María	3677	Hierba epífita	DS 849
<i>P. remotum</i> Desv.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 166
<i>Serpocaulon fraxinifolium</i> (Jacq.) A. R. Sm.	Cementos Caldas, Neira	2100	Hierba epífita	DS 653
<i>S. funckii</i> (Mett.) A. R. Sm.	Torre IV, Manizales	3800	Hierba epífita	DS 686
<i>S. levigatum</i> (Cav.) A. R. Sm.	San Juan, Neira	2530	Hierba epífita	DS 768
° <i>S. sessilifolium</i> (Desv.) A. R. Sm.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 100
<i>S. triseriale</i> (Sw.) A. R. Sm.	La Violeta-El Rosario, Manizales	1472	Hierba epífita	DS 593
° <i>Terpsichore cultrata</i> (Bory ex Willd.) A. R. Sm.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 135
<i>T. lanigera</i> (Desv.) A. R. Sm.	San Carlos, Villa María	3677	Hierba epífita	DS 852
° <i>T. senilis</i> (Fée) A. R. Sm.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba epífita	DS 129
PTERIDACEAE				
° <i>Adiantum andicola</i> Liebm.	Cementos Caldas, Neira	2100	Hierba terrestre	DS 674
° <i>A. latifolium</i> Lam.	Plan Alto, Chinchiná	1480	Hierba terrestre	DS 540

Continuación Tabla 2.

MONILOPHYTA				
Taxon	Localidad	Altitud	Forma de Crecimiento	Colección
<i>A. macrophyllum</i> Sw.	Salto del Cacique, Santágueda	1050	Hierba terrestre	DS 556
° <i>A. pulverulentum</i> L.	Plan Alto, Chinchiná	1480	Hierba terrestre	NCR 451
<i>Antrophyum lineatum</i> (Sw.) Kaulf.	El Parnaso, Villa María	2300	Hierba epífita	DS 626
<i>Eriosorus flexuosus</i> (Kunth) Copel.	La Gruta, Villa María	3393	Hierba terrestre	DS 816
<i>E. hirsutulus</i> (Mett.) A. F. Tryon	La Gruta, Villa María	3393	Hierba terrestre	DS 817
° <i>E. rufescens</i> (Fée) A. F. Tryon	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 937
<i>Jamesonia scammaniae</i> A. F. Tryon	San Carlos, Villa María	3677	Hierba terrestre	DS 820
<i>Pityrogramma calomelanos</i> (L.) Link	Romelia, Palestina	1138	Hierba terrestre	DS 562
<i>P. ebenea</i> (L.) Proctor	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 106
<i>P. trifoliata</i> (L.) R. M. Tryon	Cementos Caldas, Neira	2100	Hierba terrestre	DS 668
<i>Pteris altissima</i> Poir.	Plan Alto, Chinchiná	1480	Hierba terrestre	NCR 454
<i>P. haenkeana</i> C. Presl.	La Violeta-El Rosario, Manizales	1472	Hierba terrestre	DS 581
<i>P. livida</i> Mett.	Torre IV, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 921
<i>P. longipetiolulata</i> Lellinger	Monte Verde, Manizales	1804	Hierba terrestre	DS 597
<i>P. muricata</i> Hook.	San Juan, Neira	2530	Hierba terrestre	DS 761
<i>P. quadriaurita</i> Retz.	La Violeta-El Rosario, Manizales	1472	Hierba terrestre	DS 591
° <i>Radiovittaria gardneriana</i> (Fée) E. H. Crane	San Carlos, Villa María	3677	Hierba epífita	DS 843
° <i>R. moritziana</i> (Mett.) E. H. Crane	Torre IV, Manizales	3800	Hierba epífita	DS 934
TECTARIACEAE				
<i>Tectaria incisa</i> Cav.	Montelindo, Palestina	1050	Hierba terrestre	DS 494
° <i>T. lizarzaburui</i> (Sodirol) C. Chr.	Berlín, Neira	2180	Hierba terrestre	DS 750
° <i>T. transiens</i> (C. V. Morton) A. R. Sm.	La Violeta-El Rosario, Manizales	1472	Hierba terrestre	DS 573
THELYPTERIDACEAE				
<i>Macrothelypteris torresiana</i> (Gaudich.) Ching	Jardín Botánico, Manizales	2150	Hierba terrestre	DS 444
<i>Thelypteris amphioxypteris</i> (Sodirol) A. R. Sm.	Salto del Cacique, Palestina	1050	Hierba terrestre	DS 552
° <i>T. angustifolia</i> (Willd.) Proctor	Km 41, Manizales	1012	Hierba terrestre	DS 981
° <i>T. deflexa</i> (C. Presl) R. M. Tryon	Jardín Botánico, Manizales	2150	Hierba terrestre	DS 446
° <i>T. dentata</i> (Forssk.) E. P. St. John	Jardín Botánico, Manizales	2150	Hierba terrestre	DS 445
° <i>T. eggersii</i> (Hieron.) C. F. Reed	Plan Alto, Chinchiná	1480	Hierba terrestre	DS 533
° <i>T. gardneriana</i> (Baker) C. F. Reed	Berlín, Neira	2180	Hierba terrestre	DS 745
<i>T. pusilla</i> (Mett.) Ching	Río Blanco, Manizales	2700	Hierba terrestre	DS 85
<i>T. rudis</i> (Kunze) Proctor	La Gruta, Villa María	3393	Hierba terrestre	DS 880
WOODSIACEAE				
<i>Athyrium dombeyi</i> Desv.	San Carlos, Villa María	3677	Hierba terrestre	DS 838
<i>A. ferulaceum</i> (T. Moore ex Hook.) H. Christ.	Berlín, Neira	2180	Hierba terrestre	DS 735
<i>Cystopteris fragilis</i> (L.) Bernh.	San Juan, Neira	2530	Hierba terrestre	DS 798
<i>Diplazium bogotense</i> (Karst.) Hieron.	San Juan, Neira	2530	Hierba terrestre	DS 800

Continuación Tabla 2.

MONILOPHYTA				
Taxon	Localidad	Altitud	Forma de Crecimiento	Colección
<i>D. aff. costale</i> (Sw.) C. Presl	Torre IV, Manizales	3800	Hierba terrestre	DS 936
<i>D. striatum</i> (L.) C. Presl	Romelia, Palestina	1138	Hierba terrestre	DS 569
<i>D. roemerianum</i> (Kunze) C. Presl	Monte Verde, Manizales	1804	Hierba terrestre	DS 603
LYCOPHYTA				
LYCOPODIACEAE				
<i>Huperzia hartwegiana</i> (Spring) Trevis.	San Carlos, Villa María	3677	Hierba epífita	DS 823
<i>H. hohenackeri</i> (Herter) Holub	San Carlos, Villa María	3677	Hierba epífita	DS 824
<i>H. reflexa</i> (Lam.) Trevis.	Berlín, Neira	2180	Hierba terrestre	DS 702
<i>Lycopodium clavatum</i> L.	Río Blanco, Manizales	2600	Hierba terrestre	DS 136
SELAGINELLACEAE				
<i>Selaginella diffusa</i> Spring	Cementos Caldas, Neira	2100	Hierba terrestre	DS 670
<i>S. erythropus</i> (Mart.) Spring	Romelia, Palestina	1138	Hierba terrestre	DS 563
° <i>S. geniculata</i> (C. Presl) Spring	La Violeta-El Rosario, Manizales	1472	Hierba terrestre	DS 584
° <i>S. novae-hollandiae</i> (Sw.) Spring	La Violeta-El Rosario, Manizales	1472	Hierba terrestre	DS 583
<i>S. silvestris</i> Aspl.	Berlín, Neira	2180	Hierba terrestre	DS 740

Convenciones: ° Nuevos registros para el departamento de Caldas * Especies con categoría de riesgo a la extinción. Series de colecciones, NCR: Natalia Castaño-Rubiano; DS: David Sanín.

Tabla 3. Familias con mayor número de especies y géneros en la cuenca del Río Chinchiná.

Monilophyta			
Familia	No. de especies	Familia	No. de géneros
Polypodiaceae	28	Polypodiaceae	11
Dryopteridaceae	28	Dryopteridaceae	10
Pteridaceae	20	Pteridaceae	7
Aspleniaceae	11	Aspleniaceae	1
Hymenophyllaceae	10	Hymenophyllaceae	2
Cyatheaceae	9	Cyatheaceae	4
Thelypteridaceae	9	Thelypteridaceae	2
Woodsiaceae	7	Woodsiaceae	3
Dennstaedtiaceae	6	Dennstaedtiaceae	4
Lycophyta			
Lycopodiaceae	4	Lycopodiaceae	2
Selaginellaceae	5	Selaginellaceae	1

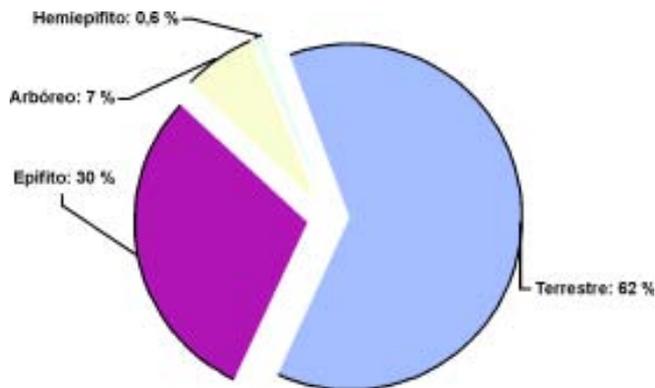


Figura 3. Distribución de los hábitos de crecimiento.

Tabla 4. Géneros con mayor número de especies en la cuenca del Río Chinchiná.

Monilophyta	
Género	No. de especies
<i>Elaphoglossum</i>	16
<i>Asplenium</i>	11
<i>Hymenophyllum</i>	9
<i>Theypteris</i>	8
<i>Pteris</i>	6
<i>Cyathea</i>	5
<i>Campyloneurum</i>	5
<i>Serpocaulon</i>	5
Lycophyta	
<i>Selaginella</i>	5
<i>Huperzia</i>	3

Tabla 5. Rangos altitudinales y distribución de la Riqueza de Monilophyta y Lycophyta en la cuenca del Río Chinchiná.

Rango altitudinal (m)	No. de especies	Terrestres	Especies / Hábitos		
			Epífitas	Arbóreas	Hemiepífitas
1000-2000	34	26	4	3	0
2000-3000	75	49	26	4	2
3000-4000	43	19	15	4	0

La mayor riqueza de Monilofitos y Licofitos se ubica entre los 2000 y 3000 m, en segundo lugar entre 3000-4000 m y, en tercer lugar entre 1000-2000 m (Tabla 5). Río Blanco es la localidad que más especies registra (65), luego Torre IV y La Fe, con 27 especies cada una, Tesorito (22), Berlín (12) y Cementos de Caldas con diez especies (Tabla 6).

En la cuenca existen seis taxones con algún grado de amenaza de extinción: dos en peligro crítico, tres en estado vulnerable, una en peligro y otra con categoría de rara (Tabla 7). De éstas, dos se encontraron en Torre IV, y una

Tabla 6. Mayores registros de Riqueza de Monilophyta y Lycophyta en 10 localidades de la cuenca del Río Chinchiná.

Localidad	No. de Especies
Río Blanco	65
La Fe	27
Torre IV	27
Tesorito	22
Berlín	12
Cementos Caldas	10
Parnaso	9
Plan Alto	9
San Juan	7
Lisboa	2

Tabla 7. Especies con alguna categoría de riesgo a la extinción en la cuenca del Río Chinchiná.

Familia	Especie	Categoría	Fuente
Aspleniaceae	<i>Asplenium auritum</i>	VU	(Rangel-Ch. 2000)
Dicksoniaceae	<i>Dicksonia sellowiana</i>	VU/EN	(Calderón 1997)
Dryopteridaceae	<i>Arachniodes denticulata</i>	CR	(Rangel-Ch. 2000)
Polypodiaceae	<i>Ceradenia mayoris</i>	VU	(Rangel-Ch. 2000)
Hymenophyllaceae	<i>Hymenophyllum karstenianum</i>	CR	(Rangel-Ch. 2000)
Dryopteridaceae	<i>Elaphoglossum tectum</i>	R	(Rangel-Ch. 2000)

Siglas: VU: Vulnerable, CR: en peligro crítico, EN: en peligro, R: Rara.

en cada sitio así: Río Blanco, vía Manizales-Termale, San Juan y Berlín (Tabla 2).

Es de aclarar que a partir del material recolectado, diez morfo-especies no han sido determinadas hasta la categoría específica, considerando la posibilidad de que éstas puedan ser nuevas para la ciencia, o registros novedosos para el país. *Thelypteris gardneriana* es el tercer registro para Colombia, ampliando el rango de distribución, hasta ahora sólo enunciado en Munchique (Departamento del Cauca) y en la Sierra Nevada de Santa Marta. Igualmente, 53 registros son nuevos para el departamento de Caldas, los cuales corresponden al 35% de las especies registradas en este estudio.

Discusión

El número de especies registradas en la cuenca del río Chinchiná constituyen una muestra representativa de la flora de Monilophyta y Lycophyta del departamento de Caldas y de la región central Andina colombiana, por cuanto los estudios realizados en diferentes relictos boscosos localizados en áreas aledañas a Manizales (**Fraume et al.** 1990, **Alvear** 2000, **Sanín et al.** 2006) e incluso en el ámbito regional en la cordillera Central (**Díaz-Piedrahita** 1996, **Vargas** 2002) (Tabla 8), muestran menores registros específicos (a pesar de las diferentes intensidades de muestreo), únicamente para el caso del departamento del Quindío se registran 25 especies más que en este estudio (**Vargas** 2002). Así mismo, el conjunto de taxones resulta diverso y bien representado, si se tiene en cuenta que de 1600 especies registradas para Colombia (**Murillo et al.** 2004), 155 se encuentran en la cuenca, cifra que corresponde aproximadamente al 9.6% de la flora del país.

La mayor concentración de géneros y especies de las familias Polypodiaceae (incluyendo Grammitidaceae) y Pteridaceae (incluyendo Vittariaceae) ya ha sido registrada en diferentes localidades premontanas y montanas (**Aguilar**

2002, **Contreras et al.** 2004, **Higuita & Álvarez** 2004, **López et al.** 2002, **Méndez et al.** 2002, **Ortiz & Peña** 2004, **Triana-Moreno & Murillo-A.** 2002), indicando la normal distribución de la riqueza en estos niveles taxonómicos. Dada la actual circunscripción de Dryopteridaceae (**Smith et al.** 2006), la cual reúne géneros de Lomariopsidaceae (vg. *Elaphoglossum*) y Tectariaceae (*Lastreopsis*, *Ctenitis* y *Megalastrum*), representa uno de los taxones más diversos dentro de Monilophyta para la Cuenca. Igualmente, los géneros *Elaphoglossum*, *Asplenium*, *Hymenophyllum*, *Thelypteris*, *Pteris* y *Cyathea* son los elementos más diversos de los bosques, similar a lo que registran **Stolze** (1981), **Contreras et al.** (2004), **Higuita & Álvarez** (2004) y **López et al.** (2002). Esto se explica por la diversidad específica de cada uno de estos géneros a nivel tropical (**Moran & Riba** 1995), la cual en Colombia también ha sido documentada por **Murillo & Harker** (1990) y **Murillo et al.** (2004).

Las especies con hábito epífita constituyen el 30% del total de la flora pteridológica mundial (Monilophyta y Lycophyta) (**Zotz & Andrade** 2002). Estas plantas representan el segundo grupo más diverso dentro de las epifitas vasculares después de Orchidaceae (**Atwood** 1984, citado por **Barrera et al.** 1996); sin embargo, esta diversidad es especialmente notoria en altitudes medias del Neotrópico (**Gentry & Dodson** 1987). En la cuenca, el porcentaje de especies epifitas es similar a las observaciones mencionadas por la bibliografía, principalmente en las zonas montanas, donde el avanzado estado de conservación es notorio en las reservas Río Blanco y Torre IV, ya que su constitución como áreas protegidas data de más de 50 años (**Sicco-Smit & Venegas-Tobar** 1964).

Existe la idea generalizada de que el número de especies se incrementa a medida que se asciende en altitud, esta distribución logra su máxima acumulación a altitudes medias, y decrece linealmente ante el aumento o incremento de altitud, especialmente entre los 1500 y 2000 m (**Gentry** 1995, **Kessler et al.** 2001, **Bhattarai et al.** 2004). Esto con-

Tabla 8. Riqueza de Monilophyta y Lycophyta en relictos locales de la cuenca del río Chinchiná y en zonas de la Cordillera Central.

Localidad	No. de especies	Rango altitudinal
Cuenca del Río Chinchiná (este estudio)	154	800-5321
Monteleón (Fraume et al. 1990)	35	2150
Reserva Torre 4 (Alvear 2000)	27	2650-2900
Río Blanco (Sanín et al. 2006)	67	2100-3600 aprox.
Vertiente occidental Cordillera Central-Parque los Nevados (Díaz-Piedrahita 1996)	60	No mencionado
Quindío y Andes Centrales (Vargas 2002)	180	900-4200

cuerda parcialmente con los registros presentados en este estudio, donde el mayor valor de riqueza se ubica en el rango comprendido entre los 2000 y los 3000 m. Sin embargo, el segundo rango se localiza entre los 3000 y los 4000 m, y el tercero entre los 1000 y 2000 m. Este último, solo presenta 34 especies, 10 menos que en el segundo rango. Tal desvío respecto a la generalidad, en la cual las altitudes medias y bajas albergan la mayor riqueza de Monilophytos y Lycophytos (Kessler 2000, Kessler *et al.* 2001, Bhattarai *et al.* 2004). Puede explicarse por los diferentes niveles de intervención antrópica en toda la cuenca, que determinan que hoy las zonas protegidas se ubiquen en las franjas de bosque montano y montano bajo, y las regiones bajas se sometan de manera intensiva a la ganadería y la agricultura industrial.

Orrego *et al.* (2002) mencionan argumentos similares, principalmente en la franja comprendida entre los 1000 y los 2000 m, debido a la pérdida ecosistémica causada porque en estas zonas se ubica buena parte de la región cafetera del país y soporta gran densidad de población (Patiño 1984, Barrera *et al.* 1996). Situaciones similares se registran con la flora de Monilophyta y Lycophyta de la región Himalaya de Nepal (Bhattarai *et al.* 2004), donde las zonas bajas se han deforestado para el control de la malaria. Igualmente, en el Monte Kinabalu (Borneo) y el Parque Nacional Carrasco (Bolivia) la implementación de sistemas productivos en zonas bajas han generado tal distribución de la diversidad, propiciada por la destrucción de los ecosistemas (Kessler *et al.* 2001).

El considerable registro de taxones nuevos para el departamento de Caldas y de posibles especies nuevas no es sorprendente, si tenemos en cuenta que las cordilleras Central y Occidental han sido las menos exploradas en Colombia (Murillo *et al.* 2004). De la misma forma Gentry (1978) menciona cómo el desconocimiento de la flora neotropical está en gran medida fundamentado por la falta de rigor en las investigaciones biológicas, especialmente en la toma de datos en campo. Esto por ejemplo es notorio en la vía Termales del Ruiz y en varias de las vías de acceso a ciudades, pueblos y veredas del departamento; donde el síndrome del colector o efecto de carretera "Road effect" (Vivas 2003) es crítico, encontrándose múltiples colecciones de los bordes en estas vías de acceso, provocando la sub-valoración al interior de los ecosistemas.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Caldas, por financiar el proyecto "Estructura y Composición Florística de la Cuenca del Río Chinchiná", del cual se deriva este trabajo,

igualmente al Herbario FAUC por facilitar la logística. A la profesora María Teresa Murillo por su apoyo en la determinación de ejemplares, la facilitación de bibliografía y por su continua, desinteresada y amable colaboración en todo el proceso. Al profesor José Murillo, por su contribución en la determinación de ejemplares, la facilitación de bibliografía, la elaboración de la clave, por sus consejos, amabilidad y acompañamiento. Al profesor Diego Giraldo-Cañas por su generoso apoyo y por las valiosas correcciones al texto final. A Néstor Fabio Alzate, Felipe Torres Laso, Liliana Arango, Leonardo Peláez y Carlos Zea por su ayuda en campo y en laboratorio.

Al Instituto de Ciencias Naturales y al Herbario Nacional Colombiano (COL), especialmente a todos los botánicos que continuamente apoyaron con comentarios y bibliografía este proceso, ellos son: Andrea León-Parrá, Luz Amparo Triana-Moreno, Diego Giraldo-Cañas, Enrique Forero, Gloria Galeano, Liz Karen Ruiz, Juan Carlos Granados-Tochoy, Jorge Contreras, Márylin Bejarano, Sofía Albesiano, Carolina Romero, Carlos Bernal, Javier Garzón, William Ariza, Orlando Rivera, Alexandra Hernández, José Luis Fernández-Alonso, Julio Betancur y Nelson Salinas. Así mismo, agradecemos a los habitantes de la cuenca, por toda la amabilidad y el acompañamiento que en varias ocasiones fue ofrecido con generosidad.

Bibliografía

- Aguilar-M., J. A. 2002. Estudio preliminar para las familias y géneros de los helechos del municipio de Bolívar, Cauca, Región del Macizo colombiano. Pag. 411. En: J. O. Rangel-Ch.; J. Aguirre-C; G. Andrade, (eds.), Libro de Resúmenes VIII Congreso Latinoamericano y II Colombiano de Botánica. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Álvarez-Mejía, L. M., D. Sanín, N. F. Alzate-Q., N. Castaño-R., J. C. Mancera-Santa & G. González-O. 2007. Plantas de la Región Centro-Sur de Caldas. Ed. Universidad de Caldas. Cuadernos de Investigación No. 28. 363 pp.
- Alvear, M. 2000. Flora y vegetación de la Reserva Torre Cuatro (Manizales, Colombia). Tesis de Grado, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Arbeláez, A. L. 1996. La tribu Pteridae (Pteridaceae). Flora de Colombia 18. Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Barrera, E., A. Chaparro & M. T. Murillo. 1996. Pteridófitas epífitas de la franja subandina del departamento de Cundinamarca, Colombia. Rev. Acad. Colomb. 20(76): 47-55.
- Bhattarai, K., O. Vetaas & J. Grytnes. 2002. Fern species richness along a central elevational gradient, Nepal. J. of Biog. 31: 389-400.

- Calderón, E.** 1997. Lista selecta de plantas de Colombia, extintas o en peligro de extinción. Anexo 1.17. Págs. 448-462. En: M. E. Chávez-S, & N. Arango (eds.), *Diversidad Biológica*. Tomo I. Informe Nacional sobre el estado de la biodiversidad, Colombia. Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt, Ministerio del Medio Ambiente, Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, Bogotá.
- Cleef, A. M., J.O. Rangel-Ch. & S. Salamanca.** 2003. The Andean rain forest of the Parque Los Nevados Transect, Cordillera Central, Colombia. Pags: 79-143. En T. van der Hammen & A. dos Santos (eds.), *Estudios en Ecosistemas TROPANDINOS*. Vol. 5. Berlín, Alemania.
- Contreras-D., R. G. Bogotá & J. C. Jiménez.** 2004. Pteridoflora presente en los bosques circundantes de la vereda Marilandia, municipio de Chipaque, Cundinamarca (Colombia). Pág. 282. En: B. Ramírez-P.; D. Macías & G. Varona, (eds.), *Libro de resúmenes III Congreso Colombiano de Botánica*. Universidad del Cauca, Popayán.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas-Aguas de Manizales.** 1999. Plan de Ordenamiento Ambiental del territorio de la cuenca del Río Chinchiná. Síntesis del Diagnóstico. Tomo I, Manizales.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas.** 2000. Coleccionable "Gestión Ambiental". No. 1. La Cuenca del Río Chinchiná, Manizales.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas.** 2001. Plan de gestión ambiental para Caldas 2001-2006, Manizales.
- Cuatrecasas, J.** 1958. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. *Perez-Arbelaezia* 2(8): 155-283.
- Díaz-Piedrahita, S.** 1996. La Cuenca del acueducto de Manizales y su vegetación. Págs. 147-156. En: L. López, & C. Arboleda, (eds.), *Manizales la Ciudad del Agua*. Disloque Editores. Instituto Caldense de Cultura, Manizales.
- Fraume, M., L. M. Álvarez-M. & J. H. Gallego.** 1990. Monteleón, relicto de selva andina tropical de Manizales, Colombia. *Revista Agronomía* 4(1): 24-35.
- Galeano-P., M. P.** 1994. Composición Florística del Parque Regional Natural Ucumarí. en: Rangel-Ch. O. J. (ed). *Ucumarí un Caso Típico de la Diversidad Biótica Colombiana*. CARDER- Universidad Nacional de Colombia. Págs. 111-138.
- Gentry, A. H.** 1978. Floristic knowledge and needs in pacific tropical America. *Brittonia* 30: 134-153.
- Gentry, A. H.** 1995. Patterns of diversity and floristic composition in neotropical montane forest. Págs. 103-126. En: S. Churchill; H. Balslev; E. Forero & J. Luteyn, (eds.), *Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forest*. The New York Botanical Garden. Bronx, Nueva York.
- Gentry, A. H. & C. H. Dodson.** 1987. Diversity and biogeography of Neotropical vascular epiphytes. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 74(2): 205-233.
- Giraldo-Cañas, D.** 1997. Variación de la diversidad florística en un mosaico sucesional en la cordillera Central andina (Colombia). *Darwiniana* 38 (1-2): 33-42.
- Higuita, H. & E. Álvarez.** 2004. Riqueza y composición florística de Pteridofitas (*sensu lato*) en una parcela de una hectárea. Pág. 140. En: B. Ramírez-P.; D. Macías & G. Varona, (eds.), *Libro de resúmenes III Congreso Colombiano de Botánica*. Universidad del Cauca, Popayán.
- Holmgren, P.K., W. Keuken & E. K. Schofield.** 1981. *Index Herbariorum*. Regnum Veg. 106(1) 7 Edición.
- IPNI.** 2007. The International Plant Names Index. KEW, The Royal Botanical Garden, The Harvard University Herbarium & Australian National Herbarium. Abr. 2007. <URL: http://www.ipni.org/ipni/query_ipni.html>
- Kessler, M.** 2000. Altitudinal zonation of Andean cryptogam communities. *J. of Biog.* 27: 275—282.
- Kessler, M., B. Parris & M. Kessler.** 2001. A comparison of the tropical montane pteridophyte flora of Mount Kinabalu, Borneo, and Parque Nacional Carrasco, Bolivia. *J. of Biog.* 28(5): 611-622.
- Lellinger, D. B.** 1972. A revision of the fern genus *Niphidium*. *Amer. Fern J.* 62(4): 101-120.
- Lellinger, D. B.** 1988. Some new species of *Campyloneurum* and a provisional key to the genus. *Amer. Fern J.* 78(1): 14-35.
- Lellinger, D. B.** 1989. The ferns and ferns-allies of Costa Rica, Panamá, and the Chocó (Part 1: Psilotaceae through Dicksoniaceae). *Pteridologia* 2a: 1- 364.
- Lellinger, D. B.** 1994. Hymenophyllaceae. En: A. Görts-van Rijn (ed.), *Flora of the Guianas*. Serie B: Ferns and ferns allies, fascicle 3. Koeltz. Scientific Books, Königstein.
- López-P., M., E. Torres-M., J. Murillo-A. & M. Morales.** 2002. Composición y diversidad de los Pteridófitos en la reserva Ranchería, Paipa (Boyacá, Colombia). Pág. 358. En: J. O. Rangel-Ch., J. Aguirre-C.; G. Andrade (eds.), *Libro de Resúmenes VIII Congreso Latinoamericano y II Colombiano de Botánica*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Méndez, C. H. Sarmiento & J. Murillo-A.** 2002. Composición y diversidad de los pteridófitos de Santa María (Boyacá, Colombia). Pág. 359. En: J. O. Rangel-Ch., J. Aguirre-C.; G. Andrade (eds.), *Libro de Resúmenes VIII Congreso Latinoamericano y II Colombiano de Botánica*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Mickel, J. T. & J. H. Beitel.** 1988. Pteridophyte flora of Oaxaca, Mexico. *Memoirs of the New York Botanical Garden* 46: 1- 541.
- Mora-Osejo, L. E.** 1992. La evolución de la reproducción en la Cormobionta y de las unidades de crecimiento y floración de las Angiospermae. *Rev. Acad. Colomb.* 17 (70): 311-321.
- Moran, R. C.** 2001. Los géneros de helechos neotropicales. Una guía para estudiantes. Edición especial preparada para "Sistemática de Plantas Tropicales". The New York Botanical Garden. Bronx, Nueva York.
- Moran R. C. & R. Riba** (vol. eds.). 1995. *Psilotaceae a Salviniaceae*. En: Davidse G., Sousa M. & Knapp S. (gen. eds.). *Flora Mesoamericana*. Vol. 1. Univ. Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, D. F. **Murillo, M. T.** 1968. *Blechnum* subgénero *Blechnum* en Sur América, con especial referencia a las especies de Colombia. *Nova Hedwigia* 16(1-2): 329-366.

- Murillo, M. T.** 1988. Pteridophyta-I. Flora de Colombia 9. Instituto de Ciencias Naturales-Museo de Historia Natural. Universidad Nacional, Bogotá.
- Murillo, M. T. & M. A. Harker.** 1990. Helechos y plantas afines de Colombia. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras. No. 2. pp 323, Bogotá.
- Murillo, M. T. & J. Murillo-A.** 2004. Pteridófitos de Colombia V. El género *Anemia* (Schizaeaceae) en Colombia. Rev. Acad. Colomb. 28: 471-480.
- Murillo, M. T., J. Murillo-A. & A. León.** 2004. Los Pteridófitos de Colombia. Pág. 279. En: B. Ramírez-P.; D. Macías & G. Varona, (eds.), Libro de resúmenes III Congreso Colombiano de Botánica. Universidad del Cauca, Popayán.
- Murillo-A., J. & M. T. Murillo.** 1999. Pteridófitos de Colombia II. El género *Pityrogramma* (Pteridaceae). Rev. Acad. Coloma. 23: 89-96.
- Orrego, O., J. Botero, J. Verhelst.** 2002. Estado y conservación de los relictos de bosques andinos: El caso de Manizales, Colombia. Pág. 443. En: J. O. Rangel-Ch., J. Aguirre-C. & G. Andrade (eds.), Libro de Resúmenes VIII Congreso Latinoamericano y II Colombiano de Botánica. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Orrego, O., J. Botero, J. Verhelst, A. M. Pfeifer, J. A. López, V. M. Franco & J. G. Vélez.** 2004. Plantas vasculares del municipio de Manizales, Caldas, Colombia. Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. Caldas. 5: 61-106.
- Ortiz, M. & A. Peña.** 2004. Estudio preliminar de Pteridophyta en las reservas El Rasgón y El Diviso, Santander, Colombia. Pág. 286. En: B. Ramírez-P.; D. Macías & G. Varona (eds.), Libro de resúmenes III Congreso Colombiano de Botánica. Universidad del Cauca, Popayán.
- Patiño, V. M.** 1984. Recursos bióticos para el desarrollo en el área norandina. Cespadesia 13(47-48): 7-43.
- Pryer, K. M., E. Schuettpelz, P. G. Wolf, H. Schneider, A. R. Smith, & R. Cranfill.** 2004. Phylogeny and evolution of fern (Monilophytes) with a focus on the early leptosporangiate divergences. Amer. J. of Bot. 91(10): 1582-1598.
- Rangel-Ch., J. O.** 1995. Diversidad y frecuencia de las Familias, géneros y especies de plantas vasculares en el Transecto Parque los Nevados. Pag:419-431 En T. van der Hammen & A. dos Santos (eds.), Estudios en Ecosistemas Tropandinos. Vol. 4. Berlín, Alemania.
- Rangel-Ch., J. O.** 2000. Flora y vegetación amenazada. Págs: 785-813. En: J. O. Rangel-Ch., (ed.), Colombia, Diversidad biótica III. La región de vida paramuna en Colombia. Universidad Nacional de Colombia-Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá.
- Rangel-Ch., J. O., J. Idrobo, A.M. Cleef & T. van der Hammen.** 1995. Segunda lista de Material Herborizado en el Transecto Los Nevados. Pags: 385-419. En T. van der Hammen & A. dos Santos (eds.), Estudios en Ecosistemas Tropandinos. Vol. 4. Berlín, Alemania.
- Rangel-Ch., J. O. & A. Velásquez.** 1997. Métodos de estudio de la vegetación. Págs: 59-82. En: J. O. Rangel-Ch.; P. Lowy & M. Aguilar. (eds.), Colombia Diversidad Biótica II. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Rangel-Ch., J. O., A.M. Cleef & S. Salamanca.** 2003. The equatorial interandean and subandean forest of the Parque Los Nevados Transect, Cordillera Central, Colombia. Pags: 143-205. En T. van der Hammen & A. dos Santos (eds.), Estudios en Ecosistemas Tropandinos. Vol. 5. Berlín, Alemania.
- Salamanca, S., A. M. Cleef & J. O. Rangel-Ch.** 2003. The paramo vegetation of the volcanic Ruiz-Tolima massif. Pags: 1-79. En T. van der Hammen & A. dos Santos (eds.), Estudios en Ecosistemas Tropandinos. Vol. 5. Berlín, Alemania.
- Sanín, D., J. C. Mancera-Santa, N. Castaño-R., N. F. Alzate-Q., G. González-O. & L. M., Álvarez-Mejía.** 2006. Catálogo preliminar de las plantas vasculares de la Reserva Forestal Protectora "Río Blanco" (Manizales, Caldas, Colombia). Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. Caldas. 10: 19-44.
- Schneider, H., E. Schuettpelz, K. M. Pryer, R. Cranfill, S. Magallón. & R. Lupia.** 2004. Ferns diversity in the shadow of angiosperms. Nature 428: 553-557.
- Sicco-Smit, G. & Venegas-Tobar, L.** 1964. "Gallinazo", Plantación Experimental de la Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. Manizales - Colombia. Manuscrito, Págs. 1- 35.
- Smith, A. R.** 1982. Polypodiaceae-Thelypteridoideae. 14 (4). Flora of Ecuador 18: 1-148.
- Smith, A. R.** 1992. A review of the genus *Micropolypodium* (Grammitidaceae). Novon 2: 419-425.
- Smith, A. R.** 1993. *Terpsichore*, a new genus of Grammitidaceae (Pteridophyta). Novon 3: 478-489.
- Smith, A. R. & R. C. Moran.** 1992. *Melpomene*, a new genus of Grammitidaceae (Pteridophyta). Novon 2: 426-432.
- Smith A. R.; K. M. Pryer; E. Schuettpelz; P. Korall; H. Schneider & P. Wolf.** 2006. A classification for extant ferns. *Taxon* 55(3): 705-731.
- Steyermark, J., P. E. Berry & B. K. Holst** (eds.). 1995. Flora of the Venezuelan Guayana. Pteridophytes, Spermatophytes, Acanthaceae-Araceae (Smith A. R. ed. Pteridophyta) 2:1-217.
- Stolze, R. G.** 1981. Ferns and fern allies of Guatemala. Part II. Polypodiaceae. Fieldiana Botany. new series, 6(1-120): 238-472.
- Stolze, R. G.** 1986. Polypodiaceae-Asplenoioideae. 14 (16). Flora of Ecuador 23: 1-83.
- Triana, L. A. & J. Murillo-A.** 2002. Composición y diversidad de los pteridófitos de Albán (Cundinamarca). Pág. 219 en: J. O. Rangel-Ch., J. Aguirre-C. & G. Andrade (eds.), Libro de Resúmenes VIII Congreso Latinoamericano y II Colombiano de Botánica. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Tryon, R. M.** 1976. A revision of the genus *Cyathea*. Contribution from the Gray Herbarium of Harvard University 206: 19-98.

- Tryon, R. M.** 1986. Cyatheaceae. Flora of Ecuador **27**: 19-59.
- Tryon, R. M. & A. F. Tryon.** 1982. Fern and fern allied plants. Springer-Verlag, Nueva York.
- Tryon, R. M. & R. G. Stolze.** 1989a. Pteridophyta of Peru. Part I. 1-12. Ophyoglossaceae-Cyatheaceae. Fieldiana Botany, new series, **20**: 1- 145.
- Tryon, R. M. & R. G. Stolze.** 1989b. Pteridophyta of Peru. Part II. 13-15. Pteridaceae-Dennstaedtiaceae. Fieldiana Botany, new series, **22**: 1-125.
- Tryon, R. M. & R. G. Stolze.** 1991. Pteridophyta of Peru. Part IV. 17. Dryopteridaceae. Fieldiana Botany, new series. **27**: 1-176.
- Thouret, J. & D. Faivre.** 1989. Suelos de la Cordillera Central, Transecto Parque los Nevados . Págs. 293-441. en: T. Van der Hammen, S. Díaz-Piedrahita. & V. Álvarez (eds.), La Cordillera Central Colombiana, Transecto Parque Los Nevados Vol. 3 (Segunda parte). J. Cramer, Berlín, Alemania
- van der Hammen, T. & A. dos Santos (eds).** 2003. Studies on tropical Andean ecosystems. La Cordillera Central Colombiana, Transecto Parque Los Nevados Vol. **5**. (Ultima parte). J. Cramer, Berlín.
- Vargas, W.** 2002. Guía ilustrada de las plantas de las montañas del Quindío y los Andes Centrales. Universidad de Caldas, Centro editorial, Manizales.
- Vis, M.** 1995. Processes and patterns of erosion in natural and disturbed andean forest ecosystems. Págs. 17-183. en: T. Van der Hammen, & A. Dos Santos (eds.), La Cordillera Central Colombiana, Transecto Parque Los Nevados. Vol. 4 (Tercera parte). Estudios de Ecosistemas Tropoandinos. J. Cramer, Berlín, Alemania.
- Vivas, A. J.** 2003. Evaluación de la información de colecciones biológicas sobre los géneros *Elaeagia* y *Faramea* (Rubiaceae) en la región andina, Colombia. Págs: 1-27. Versión 2.0 (Electrónica), Instituto Alexander von Humboldt. Villa de Leyva.
- Witte, H. J. L.** 1995. Seasonal and altitudinal distribution of precipitation, temperature and humidity in the Parque Los Nevados Transect (Central Cordillera, Colombia). Págs: 279-328 en: T. Van der Hammen, & A. Dos Santos (eds.) La Cordillera Central Colombiana, Transecto Parque Los Nevados. Vol. 4. (Tercera parte). Estudios de Ecosistemas Tropoandinos. J. Cramer, Berlín.
- W³tropicos.** 1993. Nomenclatural Data Base of Missouri Botanical Garden. Abr. 2006 <URL: <http://mobot.mobot.org/W3t/Search/vas.html>>.
- Zotz, G. & J. L. Andrade.** 2002. La ecología y la fisiología de las epífitas y las hemiepífitas. Págs: 271- 296. En: M. Guariguata, & G. Kattan. (eds.), Ecología y conservación de Bosques. Cartago, Costa Rica.

Recibido: agosto 28 de 2007

Aceptado para su publicación: noviembre 15 de 2008

ANEXO

Clave para los géneros de Monilophyta y Lycophyta de la cuenca del Río Chinchiná

1. Tallos huecos, ramificación verticilada, hojas fusionadas lateralmente formando una vaina alrededor del tallo *Equisetum*
1. Tallos compactos, ramificación dicótoma, espiralada, hojas libres 2
 2. Hojas 1-nervias, vernación conduplicada, esporangios axilares 3
 3. Rizoforos presentes, hojas dispuestas en 4 hileras, 2 de hojas medias y 2 de hojas laterales *Selaginella*
 3. Rizoforos ausentes, hojas dispuestas en espiral 4
 4. Dicotomías del tallo isofilas, esporofilos y trofofilos iguales *Huperzia*
 - 4'. Dicotomías del tallo anisofilas, esporofilos y trofofilos diferentes *Lycopodium*
 2. Hojas multinervias, vernación circinada, esporangios abaxiales o marginales 5
 5. Hojas con afebias en la base del pecíolo; esporangios fusionados en sinangios 6
 6. Plantas 1-pinnadas, hojas menores de 1.20 m, dimorfas *Danaea*
 6. Plantas 3 a 4-pinnadas, hojas mayores de 1.50 m, monomorfas *Marattia*
 5. Hojas con afebias ausentes; esporangios libres 7
 7. Helechos arborescentes, con tallos masivos de circunferencias mayores a 15 cm y más de 1m de alto 8
 8. Base del pecíolo cubierto por pelos, espinas ausentes; soros marginales, indusios dobles *Dicksonia*
 8. Base del pecíolo cubierto por escamas; soros abaxiales, indusio ausente o simple 9
 9. Escamas del rizoma y del pecíolo no marginadas, setulosas, pecíolos sin espinas; indusios globosos *Sphaeropteris*
 9. Escamas del rizoma y del pecíolo marginadas, setulosas o no, pecíolos con espinas; indusios globosos, escumiformes o ausentes 10
 10. Escamas del rizoma y pecíolo con una seta apical oscura, acicular (algunas en los márgenes), tallo y pecíolos con espinas negras, muy agudas y quebradizas *Alsophila*
 10. Escamas del rizoma y del pecíolo con seta apical ausente, tallo y pecíolos con espinas verdosas, gruesas y firmes 11
 11. Nervaduras basales anastomosadas; 1-pinnada-pinnatifida; costas glabras adaxialmente; soros supramediales *Cnemidaria*
 11. Nervaduras basales libres; 2 pinnada-pinnatifida, costas pelosas adaxialmente; soros mediales a inframediales *Cyathea*
 7. Helechos herbáceos, con tallos masivos ausentes, o si presentes con diámetros menores a 15 cm, y menos de 1 m de altura 12

12. Láminas con una o dos células de grosor, membranáceas 13
13. Involucro tubular, receptáculo exerto *Trichomanes*
13. Involucro redondeado con dos valvas, receptáculo inserto *Hymenophyllum*
12. Láminas con más de tres células de grosor, papiráceas a coriáceas 14
14. Hojas ramificadas dico oseudodicotómicamente, las bifurcaciones con yemas protegidas con pelos o escamas, lámina escandente 15
15. Rizoma y yemas axilares pelosas, nervaduras 2-4 bifurcadas *Dicranopteris*
15. Rizoma y yemas axilares escamosas, nervaduras simples o una bifurcadas 16
16. Pinnas mayores de 15 cm de largo, esporas triletes *Diplopterygium*
16. Pinnas menores de 15 cm de largo, esporas monoletes *Sticherus*
14. Hojas simples o ramificadas pinnadamente, yemas ausentes o sin protección en las bifurcaciones, láminas erectas o péndulas 17
17. Lámina simple 18
18. Venación libre, soros acrosticoides *Elaphoglossum*
18. Venación anastomosada, soros redondeados a lineares 19
19. Soros redondeados a elípticos; rizoma largamente reptante, hojas dispuestas en dos hileras dorsales al rizoma, pecíolo articulado 20
20. Soros en una hilera entre el margen y el raquis 21
21. Escamas clatradas; ápice de la lámina agudo, margen simple, lámina seca de color verde claro, soros inconspicuos sobre la haz junto con las nervaduras *Pleopeltis*
21. Escamas no clatradas; ápice de la lámina acuminado, margen revoluto, lámina seca de color pardo oscuro, soros inmersos y nervaduras realzadas en la haz *Microgramma*
20. Soros en dos o más hileras entre el margen y el raquis 22
22. Soros en una hilera entre las nervaduras secundarias 23
23. Rizoma cortamente reptante; hojas cespitosas, mayores de 40 cm; escamas lanceoladas ..
 *Niphidium*
23. Rizoma largamente reptante; hojas separadas, menores de 22 cm, escamas redondeadas ...
 *Serpocaulon (S. levigatum)*
22. Soros en dos hileras entre las nervaduras secundarias *Campyloneurum*
19. Soros lineares; rizoma cortamente reptante a erecto, hojas dispuestas en espiral, pecíolos no articulados 24
24. Lámina con dos o más soros entre la costa y el margen *Antrophyum*

24. Lámina con un soro entre la costa y el margen	<i>Radiovittaria</i>
17. Lámina pinnada o más dividida	25
25. Rizoma sin escamas	26
26. Pecíolos aplanados a triangulares en la base, rizoma glabro	<i>Plagiogyria</i>
26. Pecíolo terete, rizoma con pelos	27
27. Hojas pseudodimorfas, pinas fértiles erectas, paniculiformes, emergiendo del mismo eje de las pinas basales estériles, esporangio con anillo apical	<i>Anemia</i>
27. Hojas monomorfas o dimorfas, no paniculiformes; esporangio con anillo oblicuo o vertical	28
28. Lámina con menos de 1.5 cm de ancha, 1-pinnada	<i>Jamesonia</i>
28. Lámina mayor de 1.5 cm de ancha, 1-pinnado- pinnatifida a más compleja	29
29. Indusio ausente, soro abaxial	30
30. Lámina con el envés glauco, soro redondo	<i>Lophosoria</i>
30. Lámina con el envés verdoso, soros lineares	<i>Eriosorus</i>
29. Indusio presente soro abaxial o marginal	31
31. Lámina coriácea, ápices de los segmentos decurrentes	<i>Pteridium</i>
31. Lámina membranacea o cartacea, ápices de los segmentos no decurrentes	32
32. Lámina con pinas estipuliformes en las axilas, venas anastomosadas	<i>Histopteris</i>
32. Lámina sin pinas estipuliformes, venas libres	33
33. Soros marginales (dispuestos en los senos), indusio doble, esporas triletes	<i>Dennstaedtia</i>
33. Soros abaxiales, indusio simple, esporas monoletes	<i>Hypolepis</i>
25. Rizoma con escamas	34
34. Envés con farina	<i>Pityrogramma</i>
34. Envés con farina ausente	35
35. Soros lineares, hipocrepiformes, o con esporangios a lo largo de las venas, a veces con apariencia acrosticoide	36
36. Soros marginales con el indusio formado por el margen reflexo de la lámina	37
37. Hojas tripartitas, lámina 2-pinnada a más dividida (por lo menos en las pinas basales), pecíolo pardo a oscurecido, opaco	<i>Pteris</i>
37. Hojas pinnadas, lámina 1-pinnada a 2-pinnada, pecíolo y raquis oscuros y lustrosos	<i>Adiantum</i>
36. Soros paralelos a la costa, indusios simples o dobles	38

38. Indusio abriéndose hacia la costa	<i>Blechnum</i>
38. Indusio abriéndose hacia la margen	39
39. Escamas clatradas; soros con un indusio simple	<i>Asplenium</i>
39. Escamas no clatradas; indusios pareados	<i>Diplazium</i>
35. Soros redondeados a elípticos	40
40. Rizoma largamente reptante	41
41. Hojas dispuestas en dos hileras dorsales al tallo, pecíolo articulado	42
42. Lámina densamente escamosa	<i>Polypodium</i>
42. Lámina con escamas ausentes	<i>Serpocaulon</i>
41. Hojas dispuestas en espiral, pecíolo no articulado	<i>Melpomene</i>
40. Rizoma cortamente reptante a erecto	43
43. Plantas epífitas, esporas verdes	44
44. Pecíolo conspicuo, mayor de 3 cm; láminas curvas y coriáceas	<i>Ceradenia</i>
44. Pecíolo inconspicuo 0.5-3 cm	45
45. Láminas laxas, péndulas, más de un soro por segmento	<i>Terpsichore</i>
45. Láminas rígidas, erectas, únicamente un soro por segmento	<i>Micropolypodium</i>
43. Plantas terrestres o hemiepífitas, esporas pardas o negruzcas	46
46. Lámina 1-pinnada	47
47. Pecíolo con dos haces vasculares, hojas dimorfas	<i>Thelypteris</i> (subg <i>Meniscium</i>)
47. Pecíolo con tres o más haces vasculares, hojas monomorfas	48
48. Pinnas auriculadas acroscópicamente y articuladas, soros indusiados	<i>Nephrolepis</i>
48. Pinnas de base equilátera o inequilátera, continuas con el raquis (no articuladas), soros exindusiados	<i>Cyrtomium</i>
46. Lámina 1-pinnado pinnatifida a más dividida	49
49. Plantas hemiepífitas, rizoma largamente reptante y densamente escamoso, hojas dimorfas	<i>Polybotrya</i>
49. Plantas terrestres, rizoma cortamente reptante, densamente escamoso o no, hojas monomorfas	50
50. Pecíolo con dos haces vasculares	51
51. Haces vasculares fusionados distalmente en forma de U, tricomas unicelulares, aciculares, bifurcados o estrellados	52

52. Lámina 2-pinnada a más dividida	<i>Macrothelypteris</i>
52. Lámina 1-pinnado-pinnatifida	<i>Thelypteris</i>
51. Haces vasculares no fusionados, tricomas generalmente ausentes	<i>Cystopteris</i>
50. Pecíolo con tres o más haces vasculares	53
53. Raquis, costas y cóstulas sulcados adaxialmente, y decurrentes entre sí	54
54. Margen de los segmentos oblonga a redondeada	<i>Dryopteris</i>
54. Margen de los segmentos espinulosa	55
55. Lámina 2-pinnada, pinnas y segmentos sésiles a levemente pediculados, rizoma erecto o reptante	<i>Polystichum</i>
55. Lámina 3 a 5-pinnada, pinas y segmentos pediculados, rizoma postrado a cortamente reptante	<i>Arachniodes</i>
53. Raquis, costas y cóstulas redondeados adaxialmente, o si sulcados, no decurrentes entre sí	56
56. Nervaduras anastomosadas, lámina 1 pinnado-pinnatifida a 2 pinnada	<i>Tectaria</i>
56. Nervaduras libres, lámina 2-pinnada o más compleja	57
57. Ápices de las nervaduras claviformes; tricomas adaxiales del raquis generalmente blanquecinos, mayores a 0.5 mm con ápice agudo	<i>Megalastrum</i>
57. Ápices de las nervaduras claviformes ausentes; tricomas adaxiales del raquis generalmente rojizos, menores de 0.5 mm con los ápices obtusos, aplanados	58
58. Raquis con 2 bordes laterales, prominentes adaxialmente, escamas pardo oscuro, lámina 3 pinnado-pinatífida	<i>Lastreopsis</i>
58. Raquis sin bordes, escamas doradas, lámina 2 pinnado-pinnatifida	<i>Ctenitis</i>

ROCAS VOLCÁNICAS BASÁLTICAS EN LA REGIÓN DE LURUACO. DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO - COLOMBIA

Por

Jaime Galvis Vergara* & Alcides Huguett Granados

Resumen

Galvis Vergara, J. & A. Huguett Granados: Rocas volcánicas basálticas en la región de Luruaco. Departamento del Atlántico - Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(124): 353-359, 2008. ISSN 0370-3908.

Aproximadamente a sesenta kilómetros al Sur-Oeste de la ciudad de Barranquilla, en la región de Luruaco, existe un macizo montañoso cuyos picos más altos alcanzan 450 metros sobre el nivel del mar. La morfología de ese macizo es completamente diferente a la de otras geoformas que caracterizan la región Caribe al Occidente del Río Magdalena, donde predominan serranías angostas y alargadas constituidas por sedimentitas Cenozoicas de origen marino y continental. El relieve del macizo es un contorno elíptico con exposición de rocas ígneas volcánicas, donde se desarrolla una red de drenaje dendrítica. El contorno del edificio volcánico es claramente visible en las fotografías aéreas convencionales y en imágenes de satélite (Anexo 1. Imágenes 1, 2 y 3).

Palabras clave: basaltos, calcedonia, cenozoico, Atlántico.

Abstract

Aproximately Sixty kilometers Southwest of Barranquilla there is a massif of mountains whose highest peaks are 450 meters above the sea level. The morphology of that massif, is completely different of other ranges in Atlántico department and North of Bolivar. It has an elliptic outline. It presents a dendritic drainage net. The topographic relief is completely different of the narrow elongate ranges of the Caribbean area West of Magdalena river. Those ranges are exposures of sedimentary rocks. The relief of Luruaco is the exposure of igneous rocks. The contour of the volcanic building is clearly visible in the conventional aerial photographs and images of satellite (Annexed 1. Images 1, 2 and 3).

Key words: basalts, chalceddony, cenozoic, Atlantico.

* Transv. 21 Bis No. 61B-33. Correo electrónico: jaime_galvis@yahoo.com.

Geología regional

La región objeto del presente artículo se encuentra situada en un área de corteza oceánica, conformando una amplia faja de dirección SW-NE, limitada al Sur-Oriente por una gran falla direccional, cuya traza se puede situar entre las poblaciones de Sincelejo capital del Departamento de Sucre, San Juan Nepomuceno en el Departamento de Bolívar y un sector del curso del Río Magdalena hasta el caserío de Guáimaro en el Departamento del Magdalena, colocando en contacto la corteza oceánica con una amplia plataforma de corteza siálica, de la cual hace parte la Depresión de Mompo. Al Sur-Occidente la citada corteza oceánica está limitada por la Falla Cauca-Patía, que la pone en contacto con otra región de corteza oceánica cuya evolución geológica presenta marcadas diferencias con la del presente estudio. El límite Nor-Oriental se encuentra al Este de la ciudad de Barranquilla.

La corteza oceánica en mención se encuentra cubierta, en casi toda su extensión, por sedimentitas del Cenozoico que tienen una dirección estructural SW-NE, donde las ventanas de los basaltos Cretácicos son mínimas (Anexo 1. Imagen 4).

Litología

En la zona central del Macizo de Luruaco, al Oriente y Sur-Oriente de la población de Santa Cruz, como también en las cuencas de los arroyos Cien Pesos, Sabana, Iraquita, Brazo Derecho y en un cerro denominado La Felicidad, situado al Oriente de la Ciénaga de San Juan de Tocagua, se encuentran bloques redondeados de basalto con meteorización esfereoidal embebidos en una arcilla de color rojo, observándose claramente que la mencionada arcilla es producto de la meteorización del basalto. Los bloques de basalto ocurren en forma continua, excepto por la presencia de algunos techos caídos de rocas sedimentarias (Anexo 2. Fotos 1, 2, 3, 4 y 5).

El basalto se presenta en color azulado, microcristalino, aunque en algunos lugares se alcanzan a identificar a simple vista los cristales de plagioclasa. En algunos sitios el basalto presenta una cubierta de hialoclastita de color gris claro y se hallan xenolitos de sedimentitas. No se observan lavas almohadilladas.

Hacia la periferia del edificio volcánico se presentan abundantes escorias con vesículas rellenas de calcedonia de diversos colores. Abundan en la cantera de Equipos Universal ubicada en la población de Arroyo Piedras, en el cerro La Florida e igualmente en algunos cerros al NNW de Repelón y en algunas colinas vecinas del caserío de

Pendales (Anexo 2. Fotos 6, 7 y 8). Estos depósitos fueron identificados en el estudio de Ingeominas (1985) como Conglomerados de Pendales.

Al Occidente de la población de Santa Cruz aparecen unas areniscas cuarzosas de color gris, duras y compactas, donde los mayores afloramientos se observan en el cerro Capón, conformando una estructura cupuliforme posiblemente causada por una intrusión. Estas areniscas parecen ser anteriores al episodio efusivo.

Alrededor del macizo volcánico se hallan areniscas y conglomerados poco consolidados cuyos clastos son casi exclusivamente compuestos por sílice calcedónica. Hacia el Oriente, en la margen Oriental de la Ciénaga del Guájaro, se hallan espesos depósitos de guijarros redondeados de calcedonia, conocidos como "piedra china", completamente sueltos en medio de una matriz arenosa, los cuales hacen parte de la unidad geológica identificada por Ingeominas (1985) como Gravas de Rotinet de edad Cuaternaria. Estos depósitos forman una aureola distante de los relieves de rocas volcánicas y aparentemente se trata de paleo-placeres litorales sedimentados alrededor de las islas volcánicas.

Al Occidente de la población de Arroyo de Piedra se encuentra, en contacto con las vulcanitas, un arrecife coralino de edad Eoceno compuesto por calizas arrecifales y detríticas.

Tectónica y estructuras

Debido al bajo relieve topográfico y la intensa meteorización de las unidades litológicas, las fallas no son muy evidentes. Hay varios alineamientos muy notorios, pero no es fácil comprobar si se originan en fallas. En general las serranías que forman las sedimentitas en la periferia de la zona a la que se refiere este artículo, presentan una directriz SW-NE. (Anexo 1. Imagen 5).

Hay dos sistemas de fallas predominantes en el área circundante a la localidad de Luruaco. Un sistema SW-NE y otro SE-NW. De las primeras cabe mencionar una falla que parece encauzar al arroyo Las Caras o Las vueltas, la cual al Occidente de la localidad de Santa Cruz parece limitar la efusión basáltica al NE. Hacia el Norte de la población de Arroyo Piedras, se encuentra una falla con rumbo NW-SE, que también cruza por el caserío de Hibácharo (Anexo 1. Imagen 6).

Los aspectos estructurales locales en su mayor parte están relacionados al evento magmático. Al Sur de la Ciénaga de Luruaco, se observa una amplia estructura dómica,

la cual comprende uno de los edificios volcánicos que hay en la zona. Entre los caseríos de Santa Cruz y Arroyo Negro y limitada por la Ciénaga de Luruaco al Norte, se observa una depresión ovalada, cuyo aspecto es el de una posible caldera volcánica (Anexo 1. Imagen 7).

Al Norte de Luruaco, entre la población de Arroyo Piedras y la Ciénaga de Luruaco se presenta otro relieve dómico, en el cual también aparecen afloramientos de basalto y una periferia de escorias con abundantes vesículas rellenas de calcedonia.

Es importante anotar que las estructuras volcánicas en mención no presentan formas cónicas con cráteres centrales, se observan formas de escudo (esta denominación se refiere a un conjunto de cráteres menores, lo cual es característico del vulcanismo basáltico).

Hay una tercera estructura, la cual también puede tener origen magmático, que corresponde al cerro Capón, el cual se encuentra casi rodeado por una extensa curva formada por el cauce del Arroyo Ronco. Se presenta una especie de cúpula en cuyo contorno se halla una arenisca notablemente recristalizada y al centro una depresión, en la cual se encuentran arcillas rojas posiblemente de producto de meteorización de una roca ígnea.

En el Anexo 3 se presentan fotografías de Secciones Delgadas de las rocas basálticas, donde es común observar la presencia de cristales de plagioclasa labradorítica, piroxeno, algunos escasos fragmentos de cuarzo bipiramidal y fragmentos de una roca volcánica afanítica en una matriz vítrea propilitizada. Igualmente es común observar la presencia de calcedonia relleno vesículas y cavidades dejadas por cristales de un mineral desaparecido por disolución (Fotos Secciones Delgadas 1, 2, 3, 4, 5 y 6).

Conclusiones

Los focos volcánicos de Luruaco presentan características que permiten afirmar que fueron unas islas volcánicas durante un período no determinado del Cenozoico. Hay varias razones para afirmar que no se trata de basaltos de la corteza oceánica tales como:

- Los basaltos de Luruaco afectaron a las sedimentitas cenozoicas en el paraje de La Puntica (al Oriente de la Ciénaga de San Juan de Tocagua) donde se pueden observar las sedimentitas basculadas por efecto de una apófisis de basalto, observable también en el sitio

denominado cerro La Felicidad, donde además aparecen otros techos colgados basculados sobre los basaltos.

- Los basaltos presentan abundante vesiculación, algo que no se halla en basaltos originados en una dorsal oceánica.
- Existe una notable presencia de vidrio volcánico, lo cual no se halla en basaltos oceánicos, menos aún si son de edad Cretácea y han sido solevantados sobre el nivel del mar.
- En la población de Arroyo Piedras se presenta un arrecife coralino desarrollado sobre los basaltos, cuestión que no pudo ocurrir a profundidad. Un aspecto interesante de las paleo-islas volcánicas de Luruaco es la gran aureola de depósitos de guijarros sueltos de sílice calcedónica que los rodea al Oriente de la Ciénaga del Guájaro, llegando por el Sur al canal del Dique y por el Norte hasta la costa. Parece tratarse de paleo-terrazas marinas formadas alrededor de las islas volcánicas, en las cuales la homogeneidad del material evidencia que la fuente de dichos sedimentos se encontraba en las mismas islas. Los guijarros de basalto desaparecieron por meteorización restando los clastos de calcedonia.

Es importante anotar que en una amplia zona de corteza oceánica donde la mayor parte de los sedimentos son pelíticos, arcillas pelágicas y algunos carbonatos, las islas de Luruaco constituyeron una fuente de material detrítico, arenas y conglomerados clasto-soportados susceptibles de almacenar hidrocarburos. Cabe anotar que el hallazgo gasífero de la población de Molinero se halla dentro de la aureola detrítica de Luruaco.

Bibliografía

- Google Earth, 2005-2006.** Imágenes de Satélite del Área del Departamento del Atlántico. Colombia. Versión Privada de Google Earth v. 4.0. NASA. EEUU.
- Ingeominas, 1985.** Prospección hidrogeológica en los departamentos de Atlántico y Bolívar. Convenio bilateral de los gobiernos de Holanda y Colombia a través de Ingeominas y TNO. Bogotá.

Recibido: marzo 15 de 2007.

Aceptado para su publicación: noviembre 4 de 2008.

ANEXO 1
IMÁGENES DE SATÉLITE DE LA REGIÓN DE LURUACO.
DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO - COLOMBIA



Imagen 1. Panorámica de la región de Luruaco en el Dpto. del Atlántico. Al centro la Ciénaga de Luruaco, al Oriente la Ciénaga del Guájaro y al NW la de San Juan de Tocagua.



Imagen 4. Aspectos de las sedimentitas Terciarias que afloran al Nor-Oriente de las ciénagas de Luruaco y San Juan de Tocagua. Departamento del Atlántico.



Imagen 2. Edificios volcánicos en la región del Municipio de Luruaco, en el Departamento del Atlántico.



Imagen 5. Lineamientos de dirección NE en sedimentitas Terciarias que cubren rocas de corteza oceánica al Norte de la población de Luruaco. Departamento del Atlántico.



Imagen 3. Contornos de los dos edificios volcánicos situados al SW de la Ciénaga y la población de Luruaco y al SW de la Ciénaga de San Juan de Tocagua. Departamento del Atlántico.



Imagen 6. Trazo de una falla de dirección SW-NE, que pasa por las localidades de Santa Cruz y Las Caras en el Departamento del Atlántico.

ANEXO 1 (Continuación)



Imagen 7. Ocurrencia de un pequeño cuello volcánico ubicado al SE del caserío de Arroyo de Piedra. Departamento del Atlántico.

ANEXO 2 REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA REGIÓN DE LURUACO. DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO - COLOMBIA



Foto 1. Al fondo y en el centro, presencia de un Domo Basáltico (Cerro La Felicidad) flanqueado por rocas sedimentarias plegadas. Parte Oriental de la Ciénaga de San Juan de Tocagua.



Foto 2. Rocas volcánicas meteorizadas con vacuolas rellenas de calcedonia en la región de Luruaco. Departamento del Atlántico.



Foto 3. Meteorización esferoidal en rocas basálticas. Cerro La Felicidad, al Oriente de la Ciénaga de San Juan de Tocagua.

ANEXO 2 (Continuación)



Foto 4. Rocas basálticas con meteorización esferoidal en el Domo Basáltico situado al NE de la población de Santa Cruz en el Departamento del Atlántico.



Foto 6. Vulcanita escoriácea con vacuolas rellenas de calcedonia. Cantera de Equipos Universal en la población de Arroyo Piedras. Departamento del Atlántico.



Foto 5. Aspectos de la meteorización esferoidal en basaltos. Sector Nor-Oriental de la población de Santa Cruz. Departamento del Atlántico.



Foto 7. Basalto escoriáceo con vacuolas rellenas de calcedonia. Cantera de Equipos Universal en la población de Arroyo Piedras. Departamento del Atlántico.



Foto 8. Acumulaciones de guijarros de calcedonia causadas por el oleaje en alrededores de la paleo-isla basáltica de Luruaco.

ANEXO 3

FOTOGRAFÍA DE SECCIONES DELGADAS DE ROCAS VOLCÁNICAS EN LA REGIÓN DE LURUACO. DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO - COLOMBIA

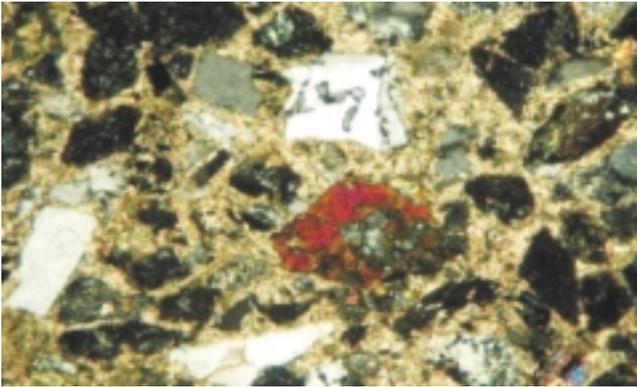


Foto sección delgada 1. Al centro, con un color de interferencia rojo, un piroxeno subhedral. Arriba, un fragmento de calcedonia. Matriz propilitizada.



Foto sección delgada 4. Al centro, cristal de plagioclasa labradorítica y entre otros del mismo feldespato y algunos fragmentos de una roca afanítica y de cuarzo.

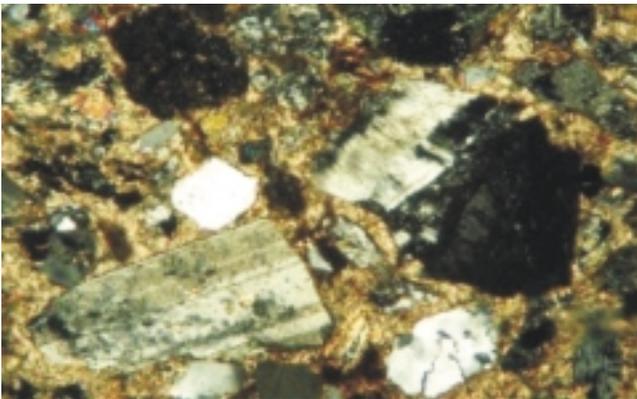


Foto sección delgada 2. Cristales de plagioclasa cálcica y un cristal de cuarzo bipiramidal en una matriz vítrea propilitizada.

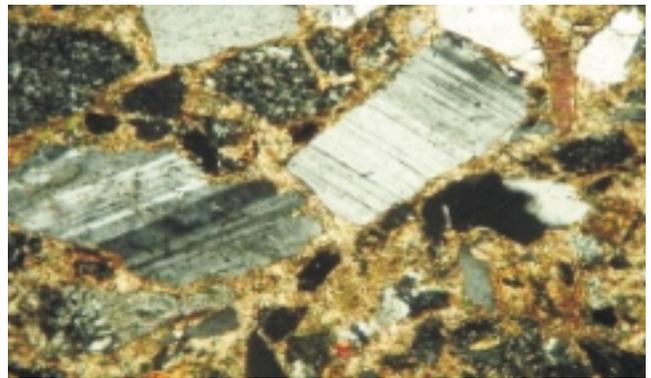


Foto sección delgada 5. Cristales de plagioclasa y un cristal de cuarzo bipiramidal en una mesóstasis propilitizada, donde se identifican pequeños cristales de piroxeno.

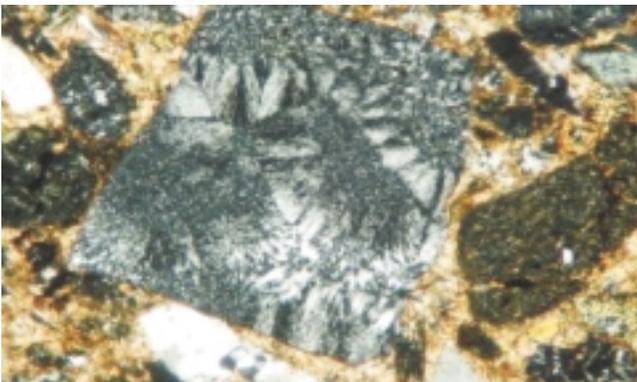


Foto sección delgada 3. Calcedonia relleno una cavidad.

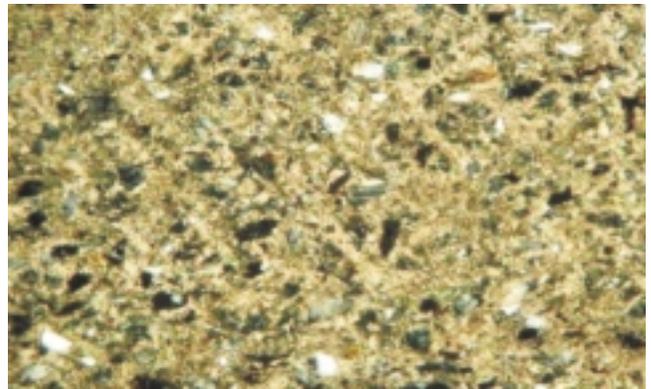


Foto sección delgada 6. Fragmentos de cuarzo bipiramidal, feldespato y chert en una matriz propilitizada.

MODELADO Y SIMULACIÓN DE MICROESTRUCTURAS PARA LA MANIPULACIÓN DE MICROPARTÍCULAS

Por

Flavio Humberto Fernández Morales*, Julio Enrique Duarte**
& Josep Samitier Martí***

Resumen

Fernández Morales, F. H., J. E. Duarte & J. S. Martí: Modelado y simulación de microestructuras para la manipulación de micropartículas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(124): 361-371, 2008. ISSN 0370-3908.

En el presente trabajo se describen los principales resultados del proceso de modelado, simulación y prueba de una microestructura de electrodos de platino, fabricada con tecnología de microsistemas y pensada para ser aplicada en la manipulación de microorganismos. Esta manipulación se realiza a través de campos eléctricos no uniformes, generados por electrodos interdigitados de 70 nm, los cuales inducen el fenómeno conocido como dielectroforesis común. Las distribuciones de potencial, campo eléctrico y fuerza dielectroforética sobre los electrodos fueron calculadas con el método de los elementos finitos. Igualmente se describen los resultados más relevantes obtenidos con partículas de poliestireno, las cuales fue posible manipular por medio de campos eléctricos no uniformes de frecuencia variable.

Palabras clave: Dielectroforesis, método de los elementos finitos, manipulación de micropartículas, microelectrodos interdigitados.

Abstract

This work is addressed to the process of modeling, simulation and testing a platinum microelectrode array manufactured in microsystems technology and designed to be applied on bioparticle manipulation. This manipulation is performed by means of non-uniform electric fields generated with interdigitated electrodes of 70 nm in size, which can originate the common dielectrophoresis phenomenon. Distributions of potential, electric field and dielectrophoretic force were calculated employing the finite element method. Furthermore, the most relevant results related to manipulation of polystyrene microparticles are also reported.

Key words: Dielectrophoresis, finite element method, microparticle manipulation, interdigitated microelectrodes.

* Profesor Asociado, Facultad Seccional Duitama. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Duitama. Grupo de Energía y Aplicación de Nuevas Tecnologías (GEANT). Carrera 18 Calle 22, Duitama, Boyacá, Colombia. Correo electrónico: flaviofml@gmail.com

** Profesor Titular, Facultad Seccional Duitama. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Duitama. Grupo de Energía y Aplicación de Nuevas Tecnologías (GEANT). Carrera 18 Calle 22, Duitama, Boyacá, Colombia. Correo electrónico: julioenriqued1@gmail.com

*** Profesor Catedrático, Departamento de Electrónica. Universidad de Barcelona c./ Martí i Franqués 1, 08028 Barcelona, España. Correo electrónico: samitier@el.ub.es

Introducción

Los microsistemas (o MEMS de su sigla en inglés Micro-Electro-Mechanical-Systems), corresponden a un conjunto de circuitos integrados en los cuales se busca localizar un sistema completo (sensores, actuadores y circuitería de control) sobre un mismo chip. Existen numerosos ejemplos de este tipo de dispositivos: sensores de presión inteligentes, acelerómetros, sensores de desplazamiento, sistemas microfluídicos sensores ópticos y sensores acústicos, entre otros (**Eaton & Smith**, 1997; **Renard**, 2000; **Kim et al.**, 1996; **Carmona et al.**, 1999; **Roulet et al.**, 2001; **Hoummadi et al.**, 1997).

Algunos microsistemas de gran auge en la actualidad, que se caracterizan por la interacción, detección, monitoreo y manipulación de variables químicas y biológicas, son los llamados BIOMEMS. A manera de ejemplo se pueden mencionar: MEMS aplicados en cirugía, suministro controlado de medicamentos, dispositivos implantables para medición e interface con el sistema nervioso, sistemas de diagnóstico poco invasivos y dispositivos desechables para la detección y diagnóstico de enfermedades (**Ahn et al.**, 2004), entre otros (**Rebello**, 2004; **Reed & Lye**, 2004; **Wise et al.**, 2004; **Haga & Esashi**, 2004).

Dentro de los BIOMEMS, la detección y caracterización de microorganismos es una de las posibilidades que generan mayor expectativa; y para conseguir dispositivos que se adapten de forma eficiente y confiable a los requerimientos de estas aplicaciones, es necesario conocer y estudiar fenómenos físicos que sean factibles de emplearse en la manipulación de biopartículas. Actualmente, desde el punto de vista físico se pueden utilizar fuerzas ópticas, ultrasónicas, magnéticas y eléctricas como mecanismo de actuación para el manejo de micropartículas (**Fernández & Samitier**, 1999). Sin embargo, los campos eléctricos no uniformes presentan enormes ventajas a la hora de diseñar dispositivos manipuladores de micropartículas, ya que solo requieren la fabricación de electrodos, con la geometría adecuada y con un tamaño comparable al de las partículas que se desea controlar (**Müller et al.**, 2003).

En el proceso de desarrollo de BIOMEMS es indispensable calcular la distribución del campo eléctrico sobre los electrodos con el fin de predecir las regiones donde las partículas serán atrapadas o aglomeradas, permitiendo de esta manera establecer la funcionalidad de la microestructura.

En vista de lo anterior, el principal objetivo de esta investigación fue el de estudiar microestructuras fabricadas con tecnología de semiconductores, las cuales generan campos eléctricos no uniformes aptos para la manipulación

de biopartículas. En este contexto la manipulación de partículas se entiende como el desplazamiento lateral, atrapado y retención de las mismas.

El trabajo está dividido en cuatro secciones de manera que en la primera se hace una breve descripción del fenómeno conocido como dielectroforesis. Es decir el comportamiento de cuerpos eléctricamente neutros bajo la influencia de campos eléctricos no uniformes.

La segunda sección está dedicada a los principales resultados obtenidos en el modelado y simulación de microestructuras basadas en el fenómeno dielectroforético. Las distribuciones de potencial, campo eléctrico y fuerza dielectroforética sobre electrodos fueron obtenidas con el programa comercial ANSYS, que está basado en el método de los elementos finitos para la solución de problemas físicos en diferentes dominios (térmico, electrostático, hidrodinámico, mecánico, etc.).

En la tercera sección se presenta la microestructura de electrodos interdigitados, fabricados en platino sobre una oblea de silicio, que fueron utilizados para verificar experimentalmente la ocurrencia del fenómeno dielectroforético.

En la cuarta parte se describen los resultados más relevantes obtenidos con partículas de poliestireno, las cuales fue posible manipular por medio de campos eléctricos no uniformes de frecuencia variable. Finalmente se presentan algunas conclusiones y recomendaciones.

Conceptos básicos sobre dielectroforesis

El fenómeno de dielectroforesis (DEP), definido como el movimiento de materia eléctricamente neutra causado por los efectos de la polarización en un campo eléctrico no uniforme (**Pohl**, 1951), ha sido la base de una gran cantidad de aplicaciones industriales como por ejemplo: remoción de partículas sólidas en una solución polimérica, bombeo de líquidos no conductores (**Pohl**, 1958) y medición de propiedades dieléctricas de materiales (**Pohl & Pethig**, 1977).

Gracias a los avances en las técnicas de fabricación microelectrónica, recientemente la DEP ha sido utilizada en aplicaciones de biotecnología, farmacia y biomedicina entre las cuales cabe destacar: caracterización de partículas artificiales y biopartículas (células vegetales y animales, bacterias, virus, etc.) de diferentes tipos (**Price et al.**, 1988; **Huang et al.**, 1992; **Quinn et al.**, 1996; **Gascoyne et al.**, 2004), separación de partículas sobre la base de la polarizabilidad diferencial (**Becker et al.**, 1994; **Holmes et al.**, 2003), cultivo de células sin ningún tipo de contacto con los electrodos requeridos para su manipulación (**Fuhr**

et al., 1994) y manipulación de partículas en términos de movimiento lineal, posicionamiento, levitación y confinamiento en jaulas de campo (*Schnelle et al.*, 1993; *Fuhr et al.*, 1995; *Müller et al.*, 1996; *Pethig et al.*, 2003).

La DEP se origina a causa de la polarización de una partícula eléctricamente neutra inducida por la acción de un campo eléctrico externo. Se caracteriza porque las partículas presentan un movimiento que las dirige hacia las regiones de mayor o menor intensidad del campo, de acuerdo a la relación de sus parámetros dieléctricos con los del medio circundante. La figura 1 ilustra los conceptos anteriores para un sistema de electrodos cuya distribución del campo eléctrico es no uniforme.

La fuerza translacional dielectroforética neta actuante sobre un cuerpo pequeño eléctricamente neutro dentro de un campo eléctrico no uniforme está dada, en aproximación de dipolo (*Pohl & Pethig*, 1977), por:

$$\mathbf{F} = (\boldsymbol{\mu} \cdot \nabla) \mathbf{E}, \tag{1}$$

donde $\boldsymbol{\mu}$ es el vector momento dipolar, ∇ es el operador vectorial gradiente, y \mathbf{E} es el campo eléctrico externo a la partícula.

Además, en el caso de un cuerpo homogéneo, isotrópico y linealmente polarizable, $\boldsymbol{\mu}$ viene dado como:

$$\boldsymbol{\mu} = (\alpha \cdot \nabla) \mathbf{E}, \tag{2}$$

donde α es la polarizabilidad por unidad de volumen y v es el volumen del cuerpo.

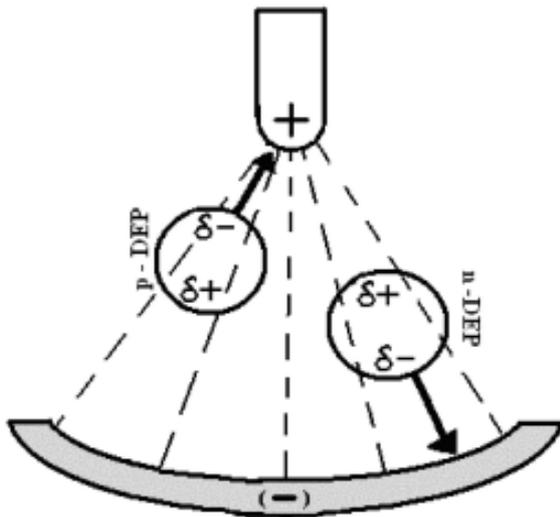


Figura 1. La partícula de la izquierda es más polarizable que el medio circundante y es atraída hacia el electrodo puntiagudo donde el campo es más denso (p-DEP), mientras que la partícula menos polarizable de la derecha es repelida lejos de allí (n-DEP).

De acuerdo con lo anterior, la ecuación (1) también se puede expresar como:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \alpha \nabla E^2. \tag{3}$$

En el caso de un cuerpo esférico, α viene definida como:

$$\alpha = 3\epsilon_0 \epsilon_m \frac{(\epsilon_p^* - \epsilon_m^*)}{(\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*)}, \tag{4}$$

donde $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (Farad m^{-1}) es la permitividad del vacío, los subíndices p y m indican partícula y medio, respectivamente, y ϵ^* indica que se consideran los parámetros de permitividad compleja que son dependientes de la frecuencia y están dados por (*Müller et al.*, 1995):

$$\epsilon^* = \epsilon_0 \epsilon - j\sigma/w, \tag{5}$$

donde ϵ es la permitividad relativa efectiva, σ es la conductividad efectiva, w es la frecuencia angular del campo eléctrico aplicado y $j = \sqrt{-1}$.

Otra forma común de presentar α en la literatura es:

$$\alpha = 3\epsilon_0 \epsilon_m F_{CM}, \tag{6}$$

donde F_{CM} es el factor de Clausius-Mosotti (o función de polarizabilidad), el cual viene dado por:

$$F_{CM} = \frac{(\epsilon_p^* - \epsilon_m^*)}{(\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*)}. \tag{7}$$

Valga decir que la ecuación (7) es aplicable al caso de una partícula homogénea sumergida en un medio líquido. Sin embargo, cuando se trabaja con estructuras más complejas como células, virus y bacterias habrá que recurrir a modelos de una o más capas que reflejen más fielmente el comportamiento de las partículas (*Fuhr et al.*, 1994a).

En el caso específico de una partícula esférica de radio r , la fuerza dielectroforética ejercida sobre ella viene dada como:

$$\mathbf{F}_{DEP} = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_m r^3 \text{Re}[F_{CM}] \nabla |\mathbf{E}|^2, \tag{8}$$

donde $\text{Re}[F_{CM}]$ es la parte real del factor de Clausius-Mosotti.

La ecuación (8) muestra que la fuerza dielectroforética es proporcional al cubo del radio de la partícula (o lo que es lo mismo a su volumen), a la parte real del F_{CM} y al gradiente del cuadrado de la intensidad del campo eléctrico. Esto último implica que la dirección de la fuerza es

independiente del signo del campo y, a su vez, el efecto dielectroforético se presentará tanto en campos continuos (CC) como en campos alternos (CA).

De la ecuación (8) también se puede concluir que la dirección de la F_{DEP} depende únicamente del signo de $Re[F_{CM}]$, el cual a su vez depende de la frecuencia y de la relación de permitividades y conductividades de partículas y medio. Las partículas que son más polarizables que el medio, es decir aquellas cuya permitividad efectiva y/o conductividad son mayores que las del líquido que las rodea, corresponderán a un valor positivo de $Re[F_{CM}]$ y la partícula experimentará una fuerza que la dirige hacia el sitio donde el campo eléctrico presenta un máximo en su intensidad; a este comportamiento se le conoce como dielectroforesis positiva (p-DEP). En forma inversa, una partícula con polarizabilidad lo suficientemente baja como para que $Re[F_{CM}]$ sea negativa, experimentará una fuerza que la dirigirá hacia un punto donde la intensidad del campo eléctrico presenta un mínimo; a este fenómeno se le denomina dielectroforesis negativa (n-DEP).

La figura 2 representa la variación de la parte real del F_{CM} contra frecuencia, de una partícula de látex, para diferentes valores de s_m . El punto donde $Re[F_{CM}]$ cambia de signo, lo cual implica el paso de p-DEP a n-DEP, se conoce como frecuencia de *crossover* (Müller *et al.*, 1996). Es importante resaltar que este tipo de gráficas es único para cada situación experimental, y la forma de la función dependerá del modelo de partícula seleccionado.

Modelado del campo eléctrico

Desde el punto de vista de modelado en DEP, el problema puede ser atacado desde dos frentes. El primero corresponde al estudio de la función de polarizabilidad de la partícula la cual depende de su forma y propiedades eléctricas. Aquí se encuentran modelos que van desde un cuerpo homogéneo hasta una partícula multicapas, pasando por el modelo de una sola capa. Así, mientras el primero es más adecuado a partículas de látex, y fue el considerado en los cálculos de esta sección, los otros dos se adaptan mejor a estructuras de mayor complejidad como las células.

La otra alternativa consiste en el cálculo cuidadoso de la distribución del campo eléctrico sobre los electrodos, ya que de ella depende el factor de no uniformidad geométrica (∇E_{RMS}^2), que en el caso de la DEP determinará los sitios en los cuales las partículas serán rechazadas o aglomeradas.

Desafortunadamente, salvo algunas configuraciones de electrodos simétricos especiales, no hay expresiones analíticas disponibles para calcular los campos y las fuerzas gene-

radas sobre una partícula que se puedan adaptar a la gran variedad de geometrías existentes. Por esta razón se hace necesaria la utilización de programas de simulación que permitan aproximar numéricamente el valor y la distribución de dichos parámetros sobre las microestructuras. En este caso se empleó el programa ANSYS que permite el análisis por elementos finitos de diversos dominios físicos (Kohnke, 1995).

Modelo de un solo electrodo: Aproximación 2-D

Los electrodos interdigitados de la figura 3 son bastante utilizados en aplicaciones de DEP. En principio, para conocer la distribución completa del campo eléctrico sobre ellos sería necesario incluir toda la geometría en un modelo tridimensional (3-D). Sin embargo, en la práctica es una buena idea el aprovechar todas las posibles simetrías de la estructura para simplificar el problema, ahorrando recursos informáticos y evitando a la vez cálculos redundantes.

El modelo se estableció considerando un corte transversal de la estructura (ver figura 4), con lo cual se asume que los conductores de los electrodos tienen una longitud infinita. Dicha simplificación es válida ya que, normalmente, su longitud es mucho mayor que su ancho. Además como la estructura es periódica y la fase de las tensiones aplicadas se repite cada dos conductores, solo sería necesario incluir dos electrodos vecinos. Pero además, debido a la simetría de la señal de alimentación, se establece una línea equipotencial ($V=0$) en el punto medio del espacio interelectródico. Esto nos lleva a que solo es necesario incluir el dominio de un electrodo, ya que la distribución del campo sobre el otro se puede obtener a partir de una reflexión del primero.

La figura 4 ilustra un modelo en el cual se incluyen algunos elementos propios del proceso de fabricación microelectrónica a saber: un sustrato de silicio sobre el cual se depositan los electrodos metálicos, una capa de SiO_2 que representa al óxido de campo generado durante el procesamiento de la oblea, el electrodo propiamente dicho y una región que representa al medio en el cual estarán ubicadas las partículas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecieron las condiciones de contorno representadas en la Figura 4, y descritas en la ecuación 9.

$$\begin{aligned} \phi(x, y)|_{y=0} &= \phi(x, y)|_{x=L} = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial x}(x, y)|_{x=0} &= \frac{\partial \phi}{\partial y}(x, y)|_{y=H} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Donde ϕ representa el potencial eléctrico, L es el ancho de un dominio del electrodo, es decir el ancho del

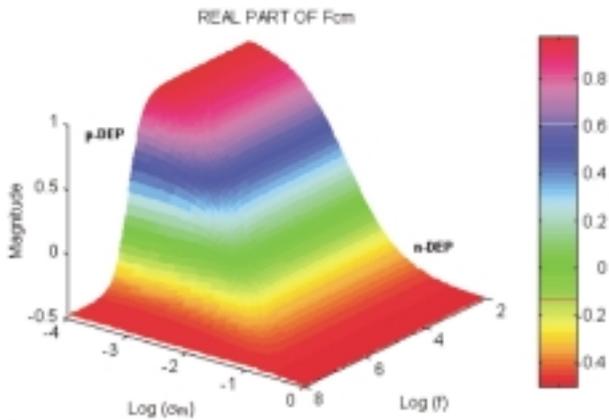


Figura 2. Variación en la magnitud de $\text{Re}[F_{CM}]$ contra frecuencia, para s_m variando entre 0 y 1 S m^{-1} . Los valores de los otros parámetros son: $\epsilon_p = 3.5$, $\epsilon_m = 80$, $\sigma_p = 9 \text{ mS m}^{-1}$.

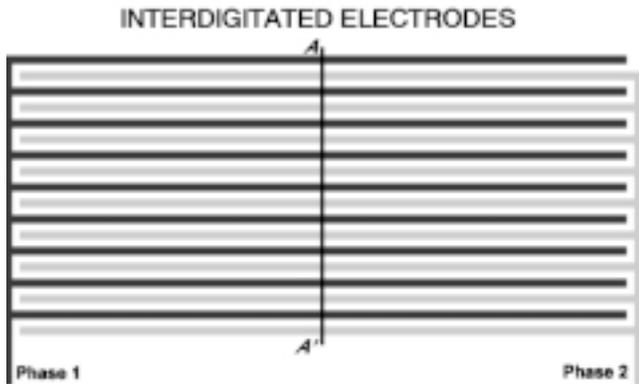


Figura 3. Esquema de un par de electrodos interdigitados. La línea A-A' indica una sección transversal parcialmente desarrollada en la figura 4.

electrodo sumado con su separación, mientras que H corresponde a la altura del medio.

El modelo así planteado permite calcular la distribución bidimensional del potencial y del campo eléctrico en el centro del canal dielectroforético que es el sitio donde interesa caracterizar el comportamiento de las partículas. En general, este tipo de modelos serán válidos no solo para los electrodos interdigitados sino para cualquier geometría que se repita periódicamente sobre el sustrato, siempre y cuando la condición de que su longitud es mucho mayor que las otras dimensiones se cumpla.

Las figuras 5 y 6 muestran las distribuciones de potencial y campo eléctrico sobre los electrodos. Así, los mayores gradientes del voltaje se presentan cerca a las esquinas de los electrodos, mientras que lejos de su superficie su valor se estabiliza permaneciendo prácticamente constante.

Como resultado de esto, las mayores inhomogeneidades del campo eléctrico estarán también localizadas alrededor de los mismos puntos.

Una vez \mathbf{E} ha sido resuelto, se puede calcular el factor de no uniformidad geométrica (∇E^2_{RMS} expresado en $\text{V}^2 \text{ mm}^{-3}$, el cual es proporcional a la F_{DEP}), tal y como se representa en la figura 7. En ella se puede observar que las inhomogeneidades se localizan alrededor de las esquinas

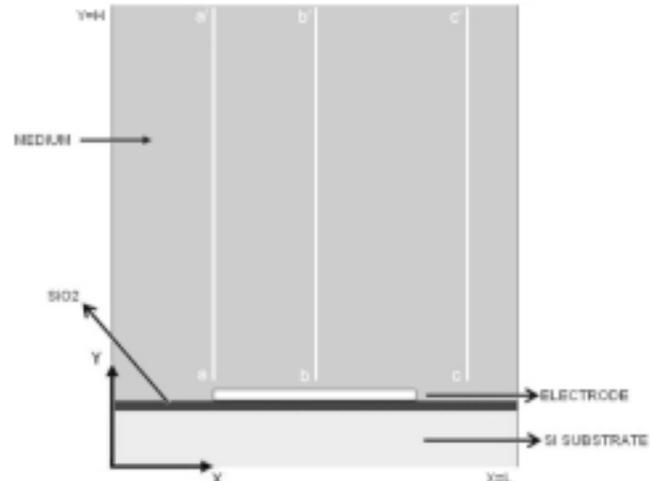


Figura 4. Dominio de un electrodo con las condiciones de contorno. Las dimensiones consideradas en los cálculos fueron: ancho y separación del electrodo $20 \mu\text{m}$, altura del Si $200 \mu\text{m}$, espesor del electrodo y la capa de SiO_2 $1 \mu\text{m}$, mientras que la altura del medio fue de $200 \mu\text{m}$. Las líneas marcadas a-a', b-b', y c-c' son caminos verticales sobre los cuales se calculó y gráfico F_{DEP} y se muestran aquí como referencia.

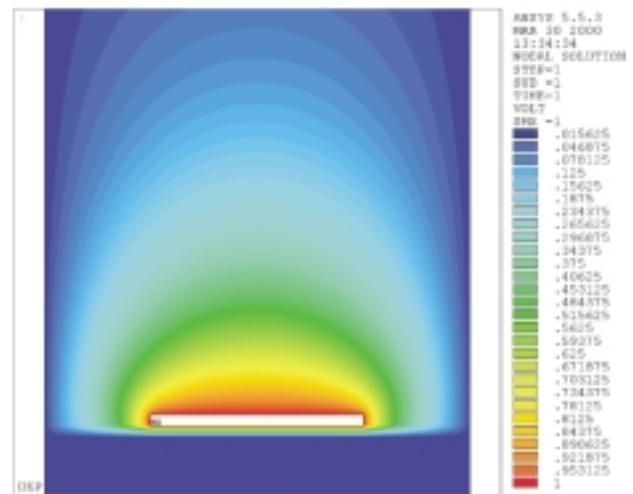


Figura 5. Distribución del potencial en voltios (V), en el dominio de un electrodo de la microestructura. La señal de prueba fue de 1 V_{pp} y el sustrato se consideró como tierra.

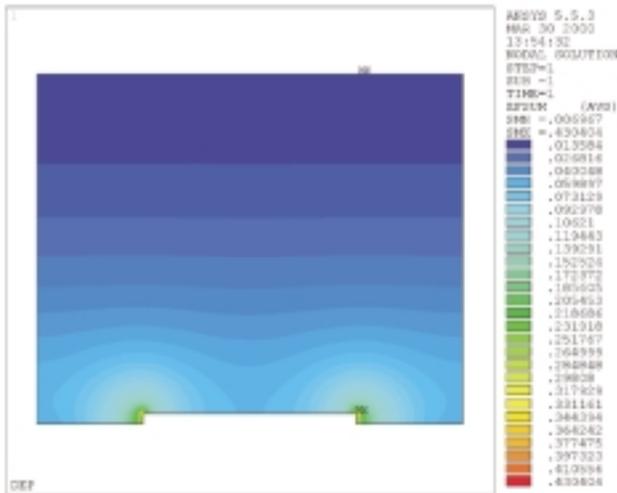


Figura 6. Distribución del campo eléctrico ($V \mu m^{-1}$), en un medio líquido (agua destilada con $\epsilon_m = 80$). El sustrato, el óxido y el electrodo no se muestran ya que E solo interesa en el medio, donde puede interactuar libremente con las partículas.

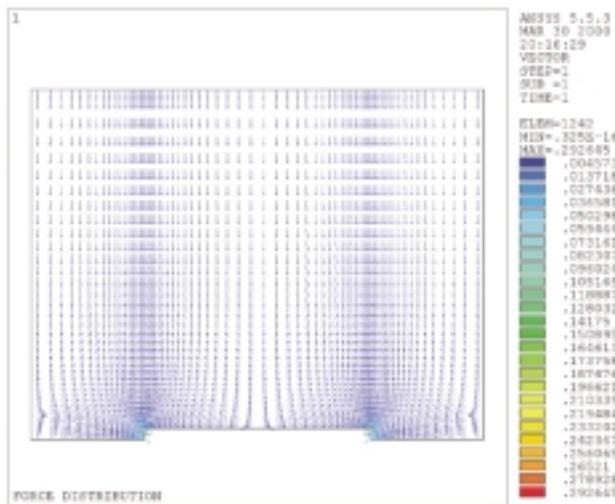


Figura 7. Representación vectorial del factor de no uniformidad (∇E^2_{RMS} expresado en $V^2 \mu m^{-3}$) dentro del medio. Para mejorar la legibilidad, las variaciones en magnitud de este factor están representadas por la escala de colores en vez de por la longitud de las flechas.

de los electrodos, puntos donde estarán los máximos de la F_{DEP} . Como se puede deducir de la ecuación (8), finalmente la F_{DEP} se calculará como el producto entre (∇E^2_{RMS}) y una constante dada por $(2\pi\epsilon_0\epsilon_m r^3 \text{Re}[F_{CM}])$.

Con los datos de la figura 7 es posible calcular la fuerza dielectroforética para diversas condiciones experimentales. La figura 8 muestra la distribución de F_{DEP} a lo largo de varios caminos ubicados a diferentes alturas sobre la superficie de los electrodos. En ella se observa que la mayor

intensidad de la fuerza se presenta cerca a las esquinas de los electrodos mientras que ésta se desvanece a medida que el punto de mira se desplaza hacia el centro del electrodo o hacia el espaciado interelectródico. La figura 9 muestra que, una vez superadas las inhomogeneidades próximas a las esquinas de los electrodos, la F_{DEP} decae exponencialmente a lo largo de los caminos verticales graficados, a medida que el punto de observación se aleja de la superficie.

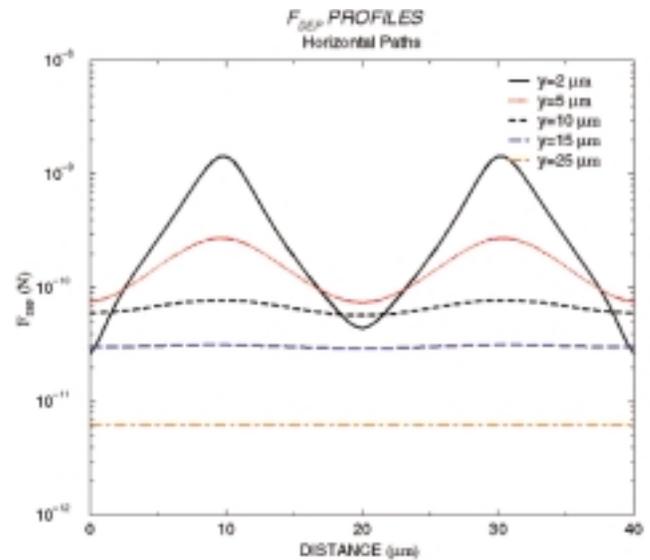


Figura 8. Perfil de la F_{DEP} a lo largo de caminos horizontales a diferentes alturas sobre los electrodos. Los cálculos se hicieron para una partícula de radio 5 mm afectada por n-DEP ($\text{Re}[F_{CM}] = -0.5$).

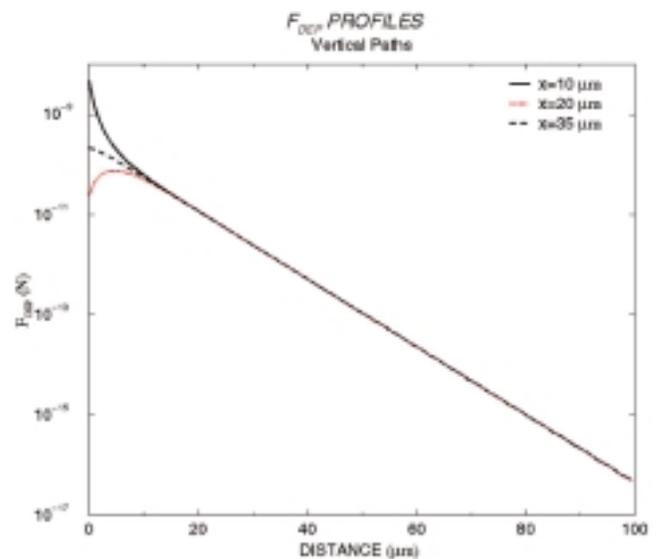


Figura 9. Perfil de la F_{DEP} a lo largo de varios caminos verticales dentro del dominio del electrodo (ver figura 4 para referencia). Los cálculos se hicieron para una partícula de radio 5 mm afectada por n-DEP ($\text{Re}[F_{CM}] = -0.5$).

Estructuras misceláneas para aplicaciones en DEP

En este apartado se estudian arreglos de electrodos interdigitados castellados clásicos y estructuras de cuatro electrodos ortogonales, o cuadrupolos, para aplicaciones en DEP. A continuación se muestra la topografía del campo eléctrico para estas estructuras, cuya distribución se obtuvo con modelos 3-D resueltos con el método de los elementos finitos.

Electrodos interdigitados castellados clásicos

Este tipo de estructuras es uno de los más populares para aplicaciones de atrapado y separación de partículas. La palabra clásico en el nombre de los electrodos significa que las bahías de diferente polaridad se hallan enfrentadas cara a cara, como se observa en la figura 10.

Gracias a la periodicidad de los electrodos no es necesario incluir toda la estructura, como se ve en la figura 10(b). Este modelo permite visualizar las distribuciones de potencial y campo eléctrico, tal y como se observa en las representaciones pseudo-topográficas de las figuras 11 y 12.

Tal y como lo indicó el modelo 2-D, las mayores inhomogeneidades del potencial y, por ende, del campo eléctrico se localizan en puntos cercanos a las esquinas de los electrodos, produciendo allí la máxima intensidad del campo, mientras que los mínimos se encuentran en la parte central del espaciado interelectródico y en las bahías de los mismos. Como resultado, las partículas más polarizables que el medio serán atraídas hacia el borde de los electrodos, mientras que las menos polarizables serán repelidas hacia las regiones de mínima intensidad del campo eléctrico.

Microelectrodos cuadrupolares

Los arreglos de electrodos cuadrupolares, polarizados convenientemente, pueden ser utilizados en aplicaciones de DEP. La figura 13 muestra uno de tales cuadrupolos que consiste en cuatro conductores colocados ortogonalmente sobre el sustrato.

El modelo 3-D representado en la figura 13 permite visualizar el perfil del campo eléctrico, tal y como se observa en la figura 14. Gracias a la simetría de la estructura y a la periodicidad en la polarización, para efectuar el cálculo solo se requiere un cuarto de la estructura.

Dando un vistazo a la distribución de **E** se hace evidente la existencia de un mínimo justo en el centro de la estructura. Además, la máxima intensidad del campo se localiza alrededor de las puntas de los electrodos. Esto implica que si una solución que contiene una mezcla de dos tipos de partículas se deposita sobre los electrodos, bajo las condiciones de frecuencia y conductividad del medio adecuadas, será posible producir su separación. Aquellas partículas que sufran de p-DEP serán atraídas hacia los bordes de los conductores, mientras que aquellas que experimenten n-DEP se concentrarán en el centro.

Dispositivo propuesto

Con el fin de verificar la ocurrencia del fenómeno DEP, se planteó el diseño y fabricación de un circuito integrado. La figura 15 muestra la sección transversal del microsistema propuesto, el cual incluye un sustrato de vidrio o silicio sobre el que se crecen los electrodos. Además se tienen un par de agujeros que permitirán la entrada y salida de la suspensión bajo estudio. También se muestran las paredes

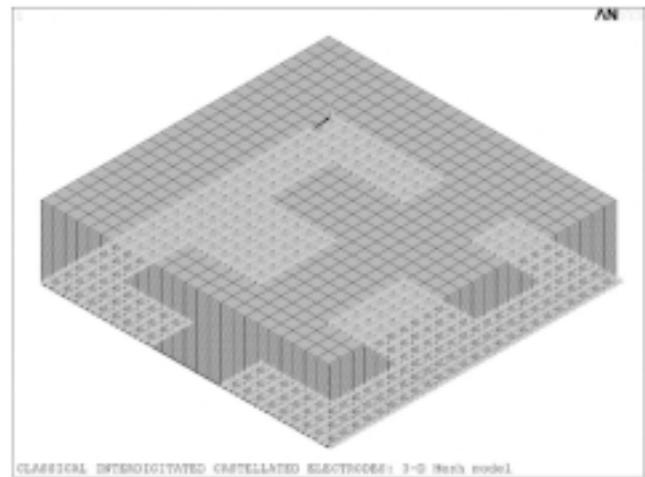
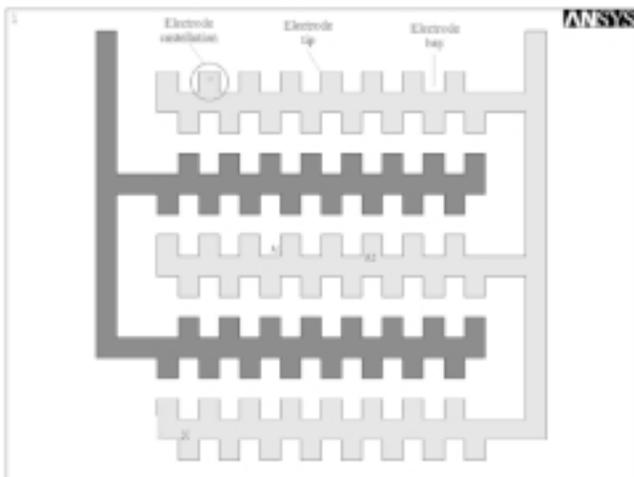


Figura 10. (a) Disposición de los electrodos interdigitados castellados clásicos. (b) Mallado 3-D en el que los puntos más claros corresponden al sitio donde se aplica el voltaje de alimentación. El tamaño de cada diente, así como la altura del medio es de 50 μm.

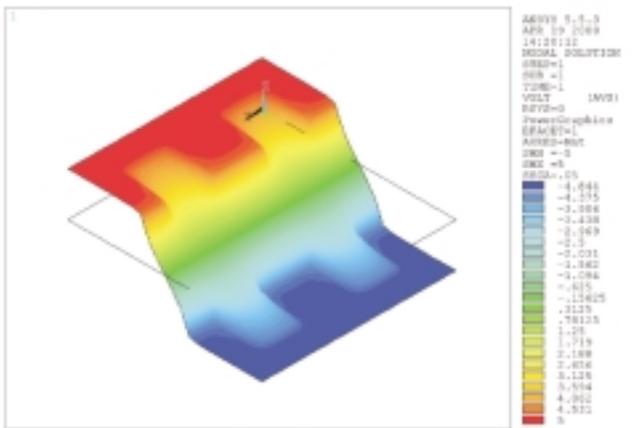


Figura 11. Representación del potencial eléctrico en un plano localizado a 2 μm sobre los electrodos. El voltaje aplicado fue ± 5 V.

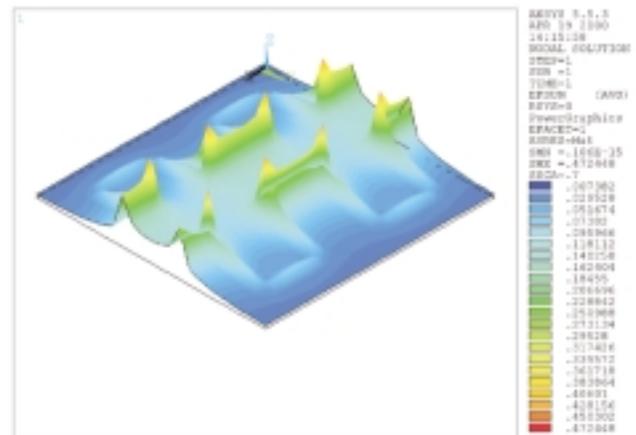


Figura 12. Distribución del campo eléctrico en un plano ubicado a 2 μm sobre la superficie de los electrodos.

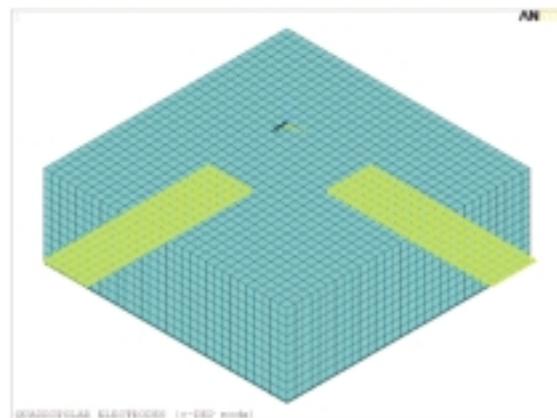
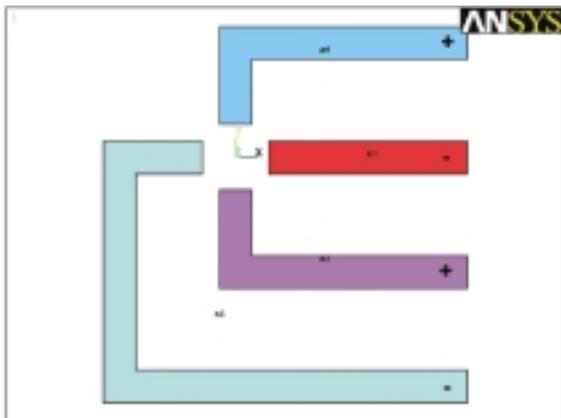


Figura 13. (a) Disposición de electrodos cuadrupolares. Los signos + y - indican la polarización de los electrodos para que funcionen en el modo DEP. (b) Mallado 3-D donde el ancho de los conductores y la altura del medio es de 50 μm .

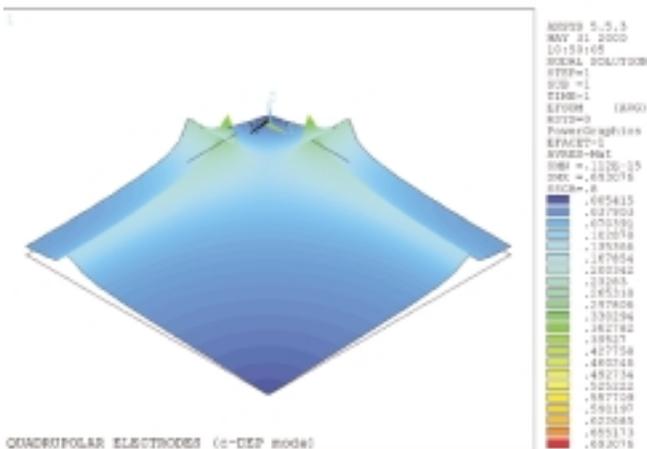


Figura 14. Representación pseudo-topográfica del campo eléctrico para un plano ubicado a 4 μm sobre la superficie de los electrodos. El voltaje de alimentación considerado fue de ± 5 V.

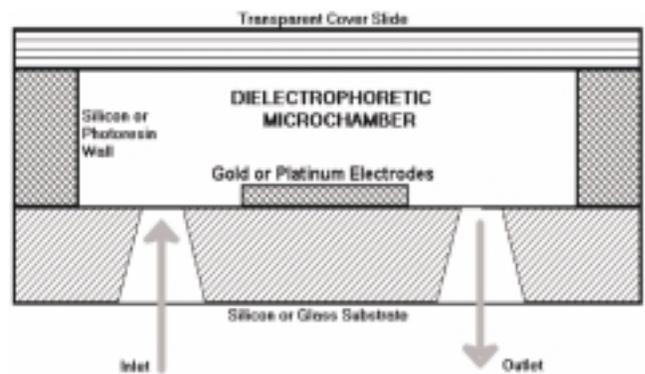


Figura 15. Sección transversal del microsistema propuesto.

que configuran la cavidad que contendrá un volumen constante de líquido durante el desarrollo de cada experimento. Finalmente, una delgada lámina de vidrio se utiliza para sellar la cavidad.

El proceso de fabricación de la microestructura se llevó a cabo en el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona (CNM), España, y como resultado de él la figura 16 presenta la geometría de los electrodos de platino, que fueron grabados mediante la técnica de *lift-off* sobre una oblea de silicio de 300 μm de grosor.

En realidad, la capa de metal contiene tres estructuras de electrodos interdigitados castellados (clásicos, desplazados y triangulares) de 50, 70 y 90 μm tanto en longitud como en separación, los cuales permiten estudios de DEP. Para mayor flexibilidad, cada conjunto de electrodos tiene sus propios terminales de conexión.

Resultados experimentales

En el presente trabajo se emplearon microesferas de poliestireno (Latex FluoSpheres carboxylate-modified, Molecular Probes Inc., Eugene, Oregon, USA) con diámetro de 4.2 μm . El empleo de esferas de látex, como partículas de prueba para MEMS destinados a manipular células, es una práctica común ya que sus propiedades físicas como tamaño y densidad son muy similares entre sí. En este caso las partículas se diluyeron en agua destilada, con conductividad de $2 \times 10^{-4} \text{ S m}^{-1}$, en una relación de 1 a 200 con respecto a su concentración original. Una vez preparada, la solución se deposita sobre la cámara dielectroforética para ser observada a través de un microscopio. La muestra se aplica sobre el integrado con una micropipeta de volumen variable entre 10 y 100 μL .

Después de colocar la muestra en la cavidad, se energizaron los electrodos de 70 μm con una señal sinusoidal de 7 V y 10 MHz. Después de algunos minutos se observó la formación de aglomerados en las bahías de los electrodos, tanto clásicos como desplazados, regiones que corresponden a la ubicación de los mínimos del campo eléctrico. La ocurrencia de n-DEP se observó hasta una frecuencia de aproximadamente 1.2 MHz, tal y como se muestra en la figura 17.

Cuando la frecuencia se reduce, manteniendo constante la amplitud de la señal aplicada, se observa el movimiento de partículas hacia las esquinas de los electrodos. Es decir, los aglomerados descritos previamente se ven atraídos hacia los puntos de máxima intensidad del campo eléctrico como consecuencia de la p-DEP. Este comportamiento se verificó para frecuencias inferiores a 800 kHz, como se ilustra en la figura 18. Al aumentar la frecuencia por encima del valor umbral las partículas retornaban a la posición inicial, indicando que se puede conmutar entre n-DEP y p-DEP colocando simplemente la frecuencia adecuada en la señal de alimentación.

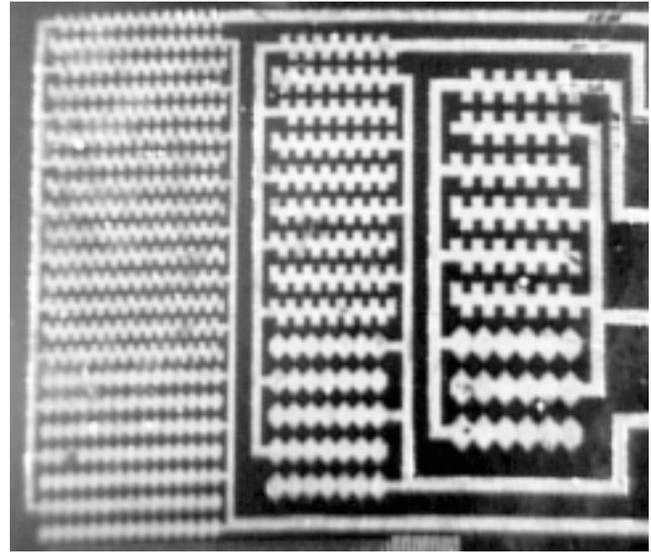


Figura 16. Microestructuras de platino con electrodos interdigitados castellados clásicos y desplazados, así como electrodos en diente de sierra.

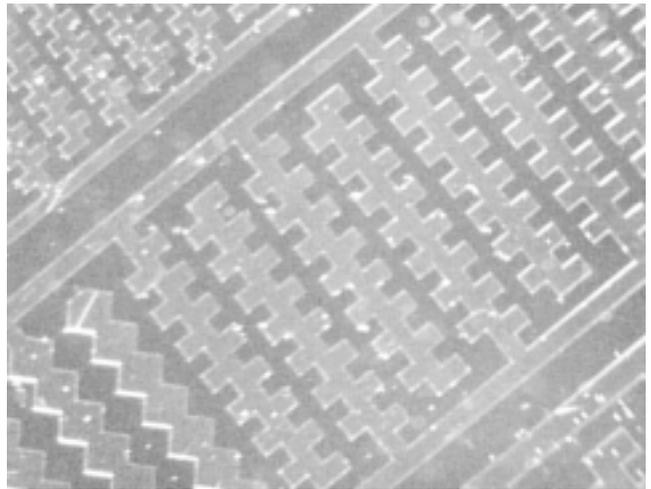


Figura 17. Agregados de partículas de poliestireno de 4.2 μm de diámetro (puntos brillantes) diluidas en agua desionizada ($\sigma_m = 2 \mu\text{S cm}^{-1}$) en una relación de 1 a 200, afectadas por n-DEP. Se aplicó una señal sinusoidal de 7 V y 1.3 MHz a los electrodos castellados de 70 μm .

Estos resultados se pueden explicar de acuerdo con el modelo de partículas homogéneas. Para los valores experimentales, es decir $\sigma_m = 2 \times 10^{-4} \text{ S m}^{-1}$, $\epsilon_m = 80$, $\epsilon_p = 3.5$, y tomando $\sigma_p = 6.2 \text{ mS m}^{-1}$, la frecuencia de cruce por cero, f_c , es de 1 MHz, como se muestra en la figura 19. Esto significa que para frecuencias superiores a f_c , las partículas experimentarán n-DEP, mientras que para valores inferiores a f_c , sucederá lo contrario.

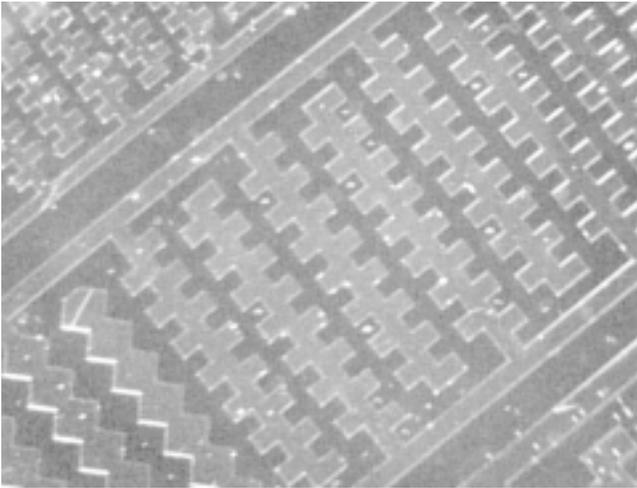


Figura 18. Aglomerados de partículas de poliestireno de 4.2 μm de diámetro, afectadas por p-DEP. Se aplicó una señal sinusoidal de 7 V y 100 kHz. El área de observación es idéntica a la de la figura 17.

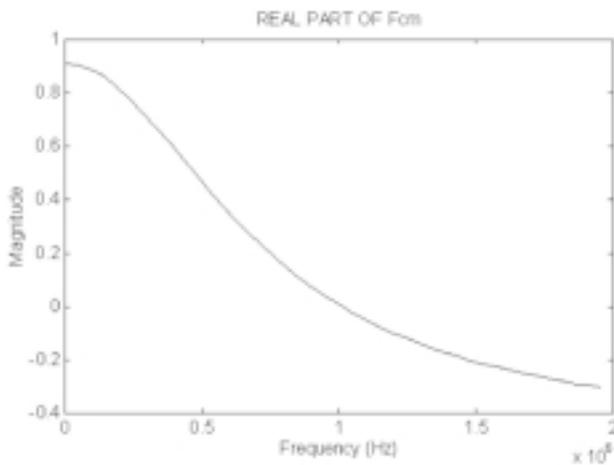


Figura 19. Parte real del factor de Clausius-Mosotti para una esfera de látex. La frecuencia de cruce por cero, f_c , es de 1 MHz.

Conclusiones

El método de los elementos finitos, FEM es una herramienta muy importante que permite la solución de diversos dominios físicos como el electrostático, el magnético, el mecánico, el fluido y sus acoplamientos. El éxito en la aplicación de este método radica en la correcta selección de la geometría, aprovechando la periodicidad y las simetrías de la estructura, al igual que en el correcto establecimiento de las condiciones de contorno.

En este caso el método FEM se usó para analizar los parámetros más importantes involucrados en el fenómeno

dielectroforético. De esta manera se hace posible predecir el sitio en el cual serán atrapadas o repelidas las partículas en función de la geometría de los microelectrodos, lo cual es importante a la hora de optimizar el diseño de las microestructuras.

Se utilizaron modelos bi- y tridimensionales para establecer la distribución del potencial, campo eléctrico y factor de no uniformidad sobre los electrodos. Aunque el modelo 2-D es más sencillo y fácil de solucionar, el modelo 3-D brinda un mayor grado de detalle en los parámetros estudiados; por ello, la elección de uno u otro dependerá de los requerimientos de la aplicación.

Se ha verificado experimentalmente la viabilidad del fenómeno dielectroforético (n- y p-DEP), con micropartículas de poliestireno, en microestructuras fabricadas con tecnología de microsistemas (MEMS). De esta manera los MEMS se presentan como una alternativa para el desarrollo de dispositivos que impliquen la manipulación de micropartículas.

Una ventaja de los microelectrodos aquí reportados es que han sido fabricados en un metal noble como el platino, lo cual facilitará su utilización con biopartículas puesto que se reducen los problemas de biocompatibilidad, evitando alteraciones en las partículas bajo estudio.

Por otro lado, el comportamiento de las partículas estudiadas con respecto a la frecuencia de la señal aplicada, pudo ser explicado en términos del modelo de partículas homogéneas. Además, el sitio hacia el cual las partículas son atraídas o repelidas corresponde con los lugares de mayor o menor intensidad del campo eléctrico sobre la estructura, como lo muestran los resultados de la simulación.

Bibliografía

- Ahn C., J. Choi, G. Beaucage, J. Nevin, J. Lee, A. Puntambekar & J. Lee. 2004. Disposable smart lab-on-a-chip for point-of-care clinical diagnostics. *Proceedings of the IEEE* **92**: 154-163.
- Becker F., X-B. Wang, Y. Huang, R. Pethig, J. Vykoukal & P. Gascoyne. 1994. The removal of human leukaemia cells from blood using interdigitated microelectrodes. *Journal of Physics D: Applied Physics* **27**: 2659-2662.
- Carmona M., S. Marco, J. Samitier, M. Acero, J. Plaza & J. Esteve. 1999. Modelling of silicon passive microvalves. The 13th European Conference on Solid-State Transducers EUROSENSORS XIII. September 12-15, 1999. The Hague. The Netherlands. 721-724.
- Eaton W. & J. Smith. 1997. Micromachined pressure sensors: review and recent developments. *Smart Mater. Struct.* **6**: 530-539.
- Fernández F. & J. Samitier. 1999. Cell handling using microsystems. 2 day course on New Technologies in Biomedical Engineering

- and Ethical Issues, EURO-BME'99. April 8-9, 1999. Barcelona, España. 94-114.
- Fuhr G., H. Glasser, T. Müller & T. Schnelle.** 1994. Cell manipulation and cultivation under a.c. electric field influence in highly conductive culture media. *Biochimica et Biophysica Acta* **1201**: 353-360.
- Fuhr G., T. Müller, T. Schnelle, R. Hagedorn, A. Voigt & S. Fiedler.** 1994a. Radio-frequency microtools for particle and living cell manipulation. *En: Naturwissenschaften* **81**: 528-535.
- Fuhr G., T. Schnelle, T. Müller, H. Glasser, T. Lisec & B. Wagner.** 1995. Positioning and manipulation of cells and microparticles using miniaturized electric field traps and travelling waves. *Sensors and materials* **7**: 131-146.
- Gascoyne P. Y. J. Vikoukal.** 2004. Dielectrophoresis-based sample handling in general-purpose programmable diagnostics instruments. *Proceedings of the IEEE* **92**: 22-42.
- Haga Y. & M. Esashi.** 2004. Biomedical microsystems for minimally invasive diagnosis and treatment. *Proceedings of the IEEE* **92**: 98-114.
- Holmes D., N. Green & H. Morgan.** 2003. Microdevices for dielectrophoretic flow-through cell separation. *IEEE in Medicine and Biology Magazine* **22**: 85-90.
- Hoummadi L., A. Campitelli & W. Wlodarski.** 1997. Acoustic wave sensors: design, sensing mechanisms and applications. *Smart Mater. Struct.* **6**: 647-657.
- Huang Y., R. Hölzel, R. Pethig & X-B. Wang.** 1992. Differences in the AC electrodynamic of viable and non-viable yeast cells determined through combined dielectrophoresis and electrorotation studies. *Physics in Medicine and Biology* **37**: 1499-1517.
- Kim J., V. Varadan, V. Varadan & X. Bao.** 1996. Finite element modeling of a smart cantilever plate and comparison with experiments. *Smart Mater. Struct.* **5**: 165-170.
- Kohnke, P.** 1995. ANSYS Theory Reference Manual release 5.5. Swanson Analysis Systems Inc.
- Müller T., A. Gerardino, T. Schnelle, S. Shirley, G. Fuhr, G. De Gasperis, R. Leoni & F. Bordoni.** 1995. High-frequency electric-field trap for micron and submicron particles. *Il Nuovo Cimento* **17 D**: 425-432.
- Müller T., A. Gerardino, T. Schnelle, S. Shirley, F. Bordoni, G. De Gasperis, R. Leoni & G. Fuhr.** 1996. Trapping of micrometre and sub-micrometre particles by high-frequency electric fields and hydrodynamic forces. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **29**: 340-349.
- Müller T., A. Pfennig, P. Klein, G. Gradl, M. Jäger & T. Schnelle.** 2003. The potential of dielectrophoresis for single-cell experiments. *IEEE in Medicine and Biology Magazine* **22**: 51-61.
- Pethig R., M. Talary & R. Lee.** 2003. Enhancing traveling-wave dielectrophoresis with signal superposition. *IEEE in Medicine and Biology Magazine* **22**: 43-50.
- Pohl H. A.** 1951. The motion and precipitation of suspensions in divergent electric fields. *J. of Appl. Phys.* **22**: 869-871.
- Pohl H. A.** 1958. Some effects of nonuniform fields on dielectrics. *En: J. Appl. Phys.* **29**: 1182-1188.
- Pohl H. A. & R. Pethig.** 1977. Dielectric measurements using non-uniform electric field (dielectrophoretic) effects. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **10**: 190-193. Corrigendum 883.
- Price J., J. Burt & R. Pethig.** 1988. Applications of a new optical technique for measuring the dielectrophoretic behaviour of micro-organisms. *Biochimica et Biophysica Acta* **964**: 221-230.
- Quinn C., G. Archer, W. Betts & J. O'Neill.** 1996. Dose-dependent dielectrophoretic response of *Cryptosporidium* oocysts treated with ozone. *Letters in Applied Microbiology* **22**: 224-228.
- Rebello K.** 2004. Applications of MEMS in surgery. *Proceedings of the IEEE* **92**: 43-55.
- Reed M. & W. Lye.** 2004. Microsystems for drug and gene delivery. *Proceedings of the IEEE* **92**: 56-75.
- Renard S.** 2000. Industrial MEMS on SOI. *J. Micromech. Microeng.* **10**: 245-249.
- Roulet J., R. Volkel, H. Herzig, E. Verpoorte & R. Dandliker.** 2001. Fabrication of multilayer systems combining microfluidics and microoptical elements for fluorescence detection. *Journal of Microelectromechanical Systems* **10**: 482-491.
- Schnelle T., R. Hagedorn, G. Fuhr, S. Fiedler & T. Müller.** 1993. Three-dimensional electric field traps for manipulation of cells: calculation and experimental verification. *Biochimica et Biophysica Acta* **1157**: 127-140.
- Wise K., D. Anderson, J. Hetke, D. Kipke & K. Najafi.** 2004. Wireless implantable Microsystems: high-density electronic interfaces to the nervous system. *Proceedings of the IEEE* **92**: 76-97.

Recibido: enero 18 de 2007.

Aceptado para su publicación: septiembre 3 de 2008.

EFECTO DE LA CURVATURA ESPACIAL DEL UNIVERSO EN EL ESPECTRO ANGULAR DE LAS ANISOTROPÍAS EN LA TEMPERATURA DE LA RADIACIÓN CÓSMICA DE FONDO

Por

Gabriel A. Mariño¹ & Yeinzon Rodríguez^{2,3}

Resumen

Mariño, G.A. & Y. Rodríguez: Efecto de la Curvatura Espacial del Universo en el Espectro Angular de las Anisotropías en la Temperatura de la Radiación Cósmica de Fondo. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **32**(124): 373-379, 2008. ISSN 0370-3908.

El paradigma inflacionario resuelve los tres problemas clásicos de la cosmología estándar: el problema de planitud, el problema de horizonte y el problema de las reliquias no deseadas. En particular el problema de planitud se resuelve al explicar cómo la contribución relativa de la curvatura espacial del Universo $\frac{K}{a^2 H^2}$ a la densidad total de energía decrece exponencialmente durante inflación. Además, el escenario inflacionario nos ofrece un mecanismo eficiente para generar pequeñas perturbaciones en la curvatura espacial que explicarían las anisotropías en la temperatura de la radiación cósmica de fondo (RCF) observadas hoy en día. Los tradicionales modelos inflacionarios que desprecian la contribución relativa $\frac{K}{a^2 H^2}$ reproducen las recientes observaciones del satélite WMAP sobre el espectro angular C_l de las anisotropías en la temperatura de la RCF, excepto para los multipolos más pequeños, y especialmente para el cuadrupolo ($l = 2$) en el cual el valor observado presenta una inesperada caída. Este extraño comportamiento nos conduce a analizar el espectro angular C_l a grandes escalas (pequeños multipolos) teniendo en cuenta la contribución relativa $\frac{K}{a^2 H^2}$. De esta manera determinamos el tipo de curvatura característica del Universo observado más favorecida por los datos observacionales concernientes al cuadrupolo.

Palabras clave: Curvatura espacial del Universo, anomalías en la radiación cósmica de fondo.

1 Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Ciudad Universitaria, Bucaramanga, Colombia, Correo electrónico: gabriel_marino@hotmail.com

2 Centro de Investigaciones, Universidad Antonio Nariño, Cra. 3 Este No. 47A-15, Bogotá, D.C., Colombia, Correo electrónico: yeinzon.rodriguez@uan.edu.co

3 Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Ciudad Universitaria, Bucaramanga, Colombia, Correo electrónico: yrodrig@uis.edu.co

Abstract

The inflationary paradigm solves the three classical problems in standard cosmology: the flatness

problem, the horizon problem, and the unwanted relics problem. In particular the flatness problem is solved by explaining how the relative contribution of the spatial curvature of the Universe $\frac{K}{a^2 H^2}$ to the total energy density decreases exponentially during inflation. In addition, the inflationary scenario offers us an efficient mechanism to generate small perturbations in the spatial curvature that would explain the observed temperature anisotropies in the cosmic microwave background radiation (CMB). The traditional inflationary models that neglect the relative contribution $\frac{K}{a^2 H^2}$ reproduce the recent observations from the WMAP satellite on the angular spectrum C_l of the temperature anisotropies in the CMB, except for the lower multipoles, and specially for the quadrupole ($l = 2$) for which the observed value presents an unexpected fall. Such a strange behaviour leads us to analyze the angular spectrum C_l on large scales (low multipoles) taking into account the relative contribution $\frac{K}{a^2 H^2}$. We determine in this way the type of characteristic curvature of the observed Universe most favoured by the observational data regarding the quadrupole.

Key words: Spatial curvature of the Universe, anomalies in the cosmic microwave background radiation.

1. Introducción

El modelo de Friedmann-Robertson-Walker (FRW) adoptado como modelo estándar en cosmología, describe muy bien las propiedades de nuestro Universo observable tales como la homogeneidad e isotropía a grandes escalas, la expansión de Hubble, y la abundancia de elementos ligeros (Dodelson, 2003; Kolb & Turner, 1990; Liddle & Lyth, 2000; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008). El elemento de línea asociado en coordenadas esféricas comóviles se puede expresar como:

$$\begin{aligned} ds^2 &\equiv g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \\ &= dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2 \right], \end{aligned} \quad (1)$$

en donde $a(t)$ es el factor de expansión y K es el parámetro de curvatura espacial que describe un universo espacialmente cerrado si $K > 0$, un universo espacialmente abierto si $K < 0$, o un universo espacialmente plano o euclideo si $K = 0$. Mediante la siguiente transformación en la coordenada radial r ,

$$r = \frac{\bar{r}}{1 + \frac{1}{4}K\bar{r}^2}, \quad (2)$$

la parte espacial de la métrica de FRW luce ahora conforme a la parte espacial de la métrica de Minkowski (Mukhanov, 2005):

$$ds^2 = dt^2 - \frac{a^2(t)}{1 + \frac{K\bar{r}^2}{4}} \left[d\bar{x}^2 + d\bar{y}^2 + d\bar{z}^2 \right], \quad (3)$$

en donde las variables \bar{x} , \bar{y} , y \bar{z} están definidas como

$$\begin{aligned} \bar{x} &\equiv \bar{r} \sin \theta \cos \phi, \\ \bar{y} &\equiv \bar{r} \sin \theta \sin \phi, \\ \bar{z} &\equiv \bar{r} \cos \theta. \end{aligned} \quad (4)$$

Considerando el contenido material del Universo como un fluido perfecto con densidad de energía ρ y presión P homogéneas e isotrópicas, la componente temporal de las ecuaciones de campo de Einstein conduce a la ecuación de Friedman (Dodelson, 2003; Kolb & Turner, 1990; Liddle & Lyth, 2000; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008), la cual relaciona el parámetro de curvatura K de la métrica FRW con el parámetro de densidad de energía del Universo $\Omega = \frac{\rho}{\rho_{\text{critico}}}$:

$$\Omega - 1 = \frac{K}{a^2 H^2}, \quad (5)$$

siendo $H = \dot{a}/a$ el parámetro de Hubble, y $\rho_{\text{critico}} \equiv 3m_p^2 H^2$ en donde m_p es la masa reducida de Planck. Esta ecuación nos dice que si la densidad de energía es igual a la densidad crítica $\rho = \rho_{\text{critico}}$ el Universo es plano, i.e. $K = 0$, manteniéndose la relación $\rho = \rho_{\text{critico}}$ para cualquier tiempo cósmico t . Si por el contrario, $\rho > \rho_{\text{critico}}$ ($\rho < \rho_{\text{critico}}$), el Universo será cerrado (abierto), i.e. $K > 0$ ($K < 0$). Siendo este el caso, $K \neq 0$, el parámetro de densidad de energía de nuestro Universo evolucionará con el tiempo al igual que la contribución relativa de la curvatura $\frac{K}{a^2 H^2}$. En general el valor de esta contribución está dado por el horizonte de partículas comóvil, el cual define el campo visual para las observaciones a gran escala del Universo y depende de la

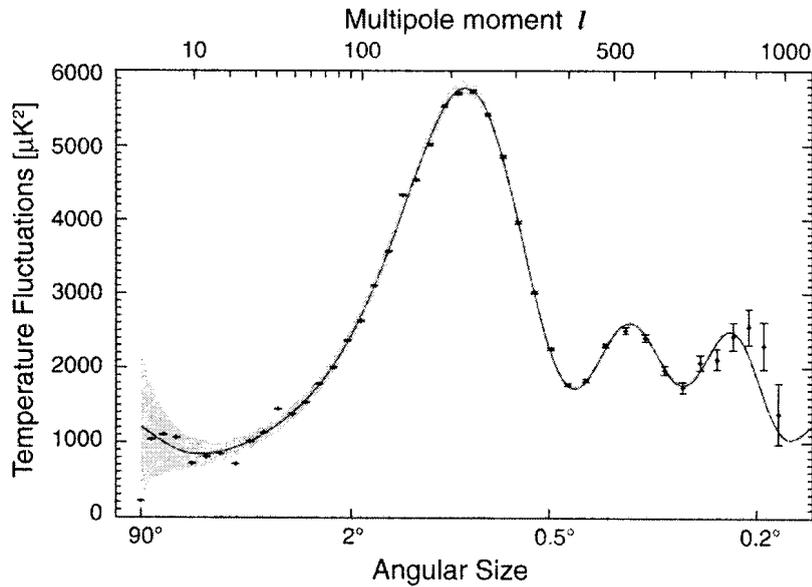


Figura 1: Espectro angular de las anisotropías de la RCF (cortesía del equipo WMAP de la NASA ([NASA's WMAP homepage: http://wmap.gsfc.nasa.gov/](http://wmap.gsfc.nasa.gov/))). Mayores valores del momento multipolar l están asociados a escalas más pequeñas del Universo. La línea continua corresponde al mejor ajuste teórico asumiendo $K = 0$. La zona gris representa la incertidumbre asociada a la varianza cósmica. El primer dato observacional a la izquierda corresponde al cuadrupolo ($l = 2$).

expansión del mismo.

Un reciente reporte de datos proveniente del satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), en combinación con las medidas de distancias de SN (Type Ia supernovae) y BAO (Baryon Acoustic Oscillations) en la distribución de galaxias, ha determinado el rango de valores permitidos a 2σ para el parámetro de densidad de energía del Universo actual como $-0,0175 < (\Omega - 1) < 0,0085$ (Komatsu et al., 2008). Lo anterior significa que la contribución relativa de la curvatura espacial puede ser tan grande como $\frac{|K|}{(a_0 H_0)^2} = 0,0175$, en donde el subíndice 0 significa que la cantidad es calculada hoy en día. Una posible explicación para esta contribución tan pequeña es que el parámetro de curvatura espacial K es igualmente pequeño ($K/a_0^2 \approx 0$), incluso nulo, lo cual corresponde físicamente a un Universo muy plano, según la ecuación (5). Debido a que esta suposición requiere un ajuste muy fino en las condiciones iniciales del Universo, generalmente se asume de manera más natural un Universo con curvatura K arbitraria positiva o negativa y se recurre al paradigma inflacionario para resolver el problema de la contribución despreciable de la curvatura.

En el escenario inflacionario el Universo temprano experimenta una expansión acelerada, $\ddot{a} > 0$, la cual provoca que el factor de expansión a crezca exponencialmente mientras

H permanece casi constante (Dodelson, 2003; Kolb & Turner, 1990; Liddle & Lyth, 2000; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008). Esto permite explicar, en vista de la ecuación (5), los valores tan pequeños para la presente contribución relativa de la curvatura espacial $\frac{K}{a_0^2 H_0^2}$, sin importar qué tan grande sea el parámetro K . Físicamente esto se debe al reducido horizonte de partículas comóvil d_c heredado de inflación el cual se puede considerar como $d_c \approx \frac{H^{-1}}{a}$, y dificulta la apreciación de la curvatura espacial dado que limita la región observable de nuestro Universo hoy en día.

Tradicionalmente los modelos inflacionarios y de universo temprano se han estudiado en el marco de curvatura espacial plana, $K = 0$. Esto debido al extremadamente pequeño valor alcanzado por $\frac{K}{a^2 H^2}$ durante inflación. Dado que las predicciones teóricas son altamente consistentes con las observaciones, se avala de esta manera la escogencia de un universo plano. Sin embargo, como se pretende señalar en este artículo, las observaciones de las anisotropías en la temperatura de la RCF a grandes escalas (pequeños multipolos) son las que presentan una mayor desviación del comportamiento predicho por el modelo de universo plano, en particular la supresión en el espectro angular C_l asociada con el cuadrupolo ($l = 2$) (Nolta et al., 2008) (véase la figura (1)). Dado que el valor observado para $C_{l=2}$ se encuentra aún por fuera de la incertidumbre asociada a la varianza cósmica (zona

gris en la figura (1)), la comparación entre el modelo de FRW con curvatura K y el valor observado para $C_{l=2}$ permiten determinar el tipo de curvatura más favorecida por este último dato observacional (Efstathiou, 2003; Massó et. al., 2006).

2. Efecto de la curvatura espacial en el espectro angular de las anisotropías en la temperatura de la RCF

Un modelo más realista del Universo incluye adicionalmente las perturbaciones en la métrica. Éstas pueden ser categorizadas en tres distintos tipos: escalares, vectoriales y tensoriales (Mukhanov, Feldman, & Brandenberger, 1992). Sólo se considerarán en este artículo las perturbaciones escalares pues son éstas, las que a primer orden, generan las inhomogeneidades en la densidad de energía del Universo, esenciales para la formación de estructuras. Dichas inhomogeneidades son finalmente responsables de las anisotropías en la temperatura de la RCF, $\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$ (Hinshaw et. al., 2008).

El método más simple para modelar las inhomogeneidades en la densidad de energía ρ (y la curvatura espacial) supone que éstas fueron impresas en el Universo temprano debido a las fluctuaciones cuánticas asociadas a algún campo escalar ψ que domina dicha densidad de energía durante el período inflacionario. El campo ψ es por lo tanto el responsable de generar inflación y por ende se le denomina "inflatón". Las fluctuaciones cuánticas en ψ adquieren un carácter clásico a la salida del horizonte (Lyth, 1985; Lyth & Seery, 2008), y contribuyen al tensor momentum-energía generando, a través de las ecuaciones de Einstein, perturbaciones en la métrica de FRW. El tensor métrico perturbado $g_{\mu\nu}$ se define mediante la expresión (Mukhanov, 2005; Mukhanov, Feldman, & Brandenberger, 1992):

$$g_{\mu\nu}(\vec{x}, t) = \begin{pmatrix} 1 + 2A & 0 \\ 0 & -\frac{a^2}{1+K\vec{r}^2/4} (1 - 2A)\delta_{ij} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

en el llamado gauge longitudinal y en ausencia de presiones anisotrópicas, siendo A la denominada perturbación intrínseca en la curvatura.

La relación entre las perturbaciones métricas y el campo ψ está dada por las ecuaciones de Einstein perturbadas a primer orden:

$$\delta G_{\mu\nu} = 8\pi G \delta T_{\mu\nu}, \quad (7)$$

siendo $G_{\mu\nu}$ el tensor de Einstein y $T_{\mu\nu}$ el tensor momentum-energía el cual es una función del campo escalar ψ . Separando el campo escalar como $\psi(\vec{x}, t) = \psi_0(t) + \delta\psi(\vec{x}, t)$,

las perturbaciones en el campo escalar $\delta\psi$ se pueden calcular a partir de la ecuación de Klein-Gordon generalizada (Mukhanov, 2005; Mukhanov, Feldman, & Brandenberger, 1992):

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \partial_\mu (\sqrt{-g} g^{\mu\nu} \partial_\nu \psi) = -V'(\psi), \quad (8)$$

con $V'(\psi)$ denotando la derivada del potencial escalar V con respecto a ψ .

Finalmente, la cantidad física a calcular es la perturbación primordial en la curvatura espacial comóvil invariante de gauge (Bardeen, 1980), definida como:

$$\zeta = -A - H \left(\frac{\delta\rho}{\dot{\rho}} \right), \quad (9)$$

la cual mide la curvatura espacial intrínseca sobre una hiper-superficie de densidad de energía uniforme. ζ está relacionada, a grandes escalas, con las anisotropías en la temperatura de la RCF medidas por un observador en (\vec{x}_0, η_0) mediante la relación de Sachs-Wolfe (Sachs & Wolfe, 1967):

$$\left(\frac{\delta T(\hat{n}, \vec{x}_0, \eta_0)}{T} \right)_{\vec{k}} = \frac{1}{5} \zeta_{\vec{k}}(\vec{x}_{UD}, \eta_{UD}), \quad (10)$$

en donde \hat{n} denota el vector unitario en la dirección en la que se observa la anisotropía, y $\zeta_{\vec{k}}(\vec{x}_{UD}, \eta_{UD})$ es calculada en la hiper-superficie de la última dispersión (la superficie espacial desde la cual recibimos la radiación cósmica de fondo generada en un tiempo conformal η_{UD}). La relación en la ecuación (10) se puede entender físicamente teniendo en cuenta que ζ representa, a través de las ecuaciones (6) y (9), el potencial gravitacional dependiente de la posición. Así, debido a las inhomogeneidades en la densidad de energía sobre la superficie de la última dispersión, cada fotón debe superar una barrera de potencial de mayor o menor altura dependiendo del sitio de emisión. De esta manera, la pérdida de energía de cada fotón, asociada a un corrimiento al rojo en su longitud de onda, corresponderá a una reducción en la temperatura asociada al fotón de acuerdo a la ley de desplazamiento de Wien (Weinberg, 2008).

Con la información presentada en la ecuación (10) se puede calcular el espectro angular C_l definido mediante el correlador de dos puntos entre dos temperaturas medidas en direcciones diferentes del espacio \hat{n}_1 y \hat{n}_2 (Dodelson, 2003; Liddle & Lyth, 2000; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008):

$$\left\langle \frac{\delta T(\hat{n}_1)}{T} \frac{\delta T(\hat{n}_2)}{T} \right\rangle = \sum_l \frac{2l+1}{4\pi} P_l(\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_2) C_l, \quad (11)$$

en donde P_l denota los polinomios de Legendre. El espectro angular C_l a grandes escalas (pequeños multipolos) dependerá, por supuesto, de la perturbación primordial en la curvatura ζ a través de las ecuaciones (10) y (11).

Un escenario sencillo en el cual se puede calcular el espectro angular dado por la relación (11) es el escenario del curvatón (Enqvist & Sloth, 2002; Lyth & Wands, 2002; Moroi & Takahashi, 2001) en el cual se desprecia la perturbación intrínseca en la curvatura durante inflación ($A = 0$). En este modelo se asume que ζ es generada por las fluctuaciones cuánticas de un campo escalar ligero débilmente acoplado σ , con potencial $V(\sigma) = \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2$, que no domina la densidad de energía del Universo durante inflación, y que por lo tanto no genera el período inflacionario. Al campo escalar σ se le denomina “curvatón” porque, a diferencia del inflatón (el campo escalar encargado de generar inflación), éste sí genera en este modelo la perturbación primordial en la curvatura ζ .

Así, ζ calculada para escalas de superhorizonte ($k \ll aH$) será proporcional únicamente a la perturbación en el campo σ :

$$\zeta_{\vec{k}}(\vec{x}, \eta) \propto \left(\frac{\delta\sigma_{\vec{k}}}{\sigma_0} \right). \quad (12)$$

Las fluctuaciones del campo σ sobre la superficie de la última dispersión (SUD) se pueden calcular mediante la ecuación (8) en coordenadas esféricas para así obtener:

$$\zeta(\vec{x}_{UD}, \eta_{UD}) \propto \sum_{l,m} \int \beta^2 d\beta \left[\frac{\delta\sigma_\beta}{\sigma_0} \right]_{\eta=\eta_*} \Phi_\beta^l(x_{UD}) Y_{lm}(\hat{n}). \quad (13)$$

En la expresión previa se ha tenido en cuenta que, en el escenario del curvatón, la razón $\frac{\delta\sigma_\beta}{\sigma_0}$ permanece constante después de la salida del horizonte durante inflación y hasta antes de que σ decaiga durante la etapa post-inflacionaria (Lyth, Ungarelli, & Wands, 2002). También se ha tenido en cuenta la contribución de todos los modos, siendo las funciones angulares Y_{lm} los armónicos esféricos, y las funciones radiales Φ_β^l las funciones hipersféricas de Bessel (Abbott & Schaefer, 1986; Harrison, 1967) con $l < \beta$. Los números de onda canónicos se definen como $\beta = \sqrt{k^2 + 1}$ para un universo cerrado, y $\beta = \sqrt{k^2 - 1}$ para un universo abierto, y el tiempo conformal η_* denota el tiempo para el cual la escala cosmológica en consideración sale del horizonte. Para el caso de un universo plano las funciones propias $\Phi_\beta^l(r)$ corresponden a las funciones esféricas de Bessel $j_l(kr)$ (Abbott & Schaefer, 1986; Harrison, 1967).

Durante inflación, y antes de salir del horizonte, las fluctuaciones $\delta\sigma$ pueden ser consideradas como operadores cuánticos. El operador de las fluctuaciones en el campo $\delta\sigma$ durante inflación se puede expandir en armónicos esféricos

de la forma

$$\delta\sigma(\vec{x}, \eta) = \sum_{lm} \int \beta^2 d\beta \{ \hat{a}_{\beta lm} \Phi_\beta^l(r) Y_{lm}(\theta, \phi) \delta\sigma_\beta(\eta) + \hat{a}_{\beta lm}^\dagger \Phi_\beta^{*l}(r) Y_{lm}^*(\theta, \phi) \delta\sigma_\beta^*(\eta) \}, \quad (14)$$

usando como coeficientes los operadores creación y destrucción $\hat{a}_{\beta lm}$ y $\hat{a}_{\beta lm}^\dagger$ los cuales satisfacen las relaciones de conmutación

$$\begin{aligned} [\hat{a}_{\beta lm}, \hat{a}_{\beta' l' m'}^\dagger] &= \frac{1}{\beta^2} \delta(\beta - \beta') \delta_{ll'} \delta_{mm'}, \\ [\hat{a}_{\beta lm}, \hat{a}_{\beta' l' m'}] &= 0, \\ [\hat{a}_{\beta lm}^\dagger, \hat{a}_{\beta' l' m'}^\dagger] &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

La escogencia más razonable para el estado cuántico del Universo durante inflación es el estado de vacío $|0\rangle$, ya que un número de ocupación promedio significativo generaría suficiente presión positiva para prevenir inflación (Liddle & Lyth, 2000).

Así, al calcular el promedio estadístico (11), se obtiene la siguiente expresión para el espectro angular C_l :

$$C_l = 4\pi^2 \int \frac{d\beta}{\beta} P_{\delta\sigma}(\beta) |\Phi_\beta^l(x_{UD})|^2, \quad (16)$$

para la cual se define el espectro escalar de potencias $P_{\delta\sigma}$ mediante (Dodelson, 2003; Kolb & Turner, 1990; Liddle & Lyth, 2000; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008):

$$P_{\delta\sigma}(\beta) = \frac{\beta^2}{4\pi^2} |\delta\sigma_\beta(\eta)|_{\eta=\eta_*}^2. \quad (17)$$

Como se observa de la ecuación (5), las escalas cosmológicas relevantes presentarán una mayor desviación de la planitud⁴. Los modos asociados a las escalas cosmológicas relevantes vienen dados por $\beta \lesssim a_0 H_0$, los cuales son iguales a los modos $\beta \lesssim a_* H_*$ cuando éstos salen del horizonte durante inflación. Así, y dado que $l < \beta$, cualquier indicio de curvatura espacial (si existiese) se observará analizando el espectro angular C_l para grandes escalas o momentos multipolares pequeños. Para este fin, se requiere el espectro escalar de potencias definido en la ecuación (17) (Mariño & Rodríguez, 2008):

$$P_{\delta\sigma}(\beta \lesssim a_0 H_0) \approx \left(\frac{H_\lambda}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{1}{1 + \frac{K}{a_0^2 H_0^2}} \right); \quad K > 0, \quad (18)$$

⁴Obsérvese que $[a(t)H(t)]^{-1}$ define la escala que cruza el horizonte en el tiempo cósmico t , i.e. $\beta = aH$. De esta manera, entre más grande sea la escala mayor será la contribución relativa $\frac{K}{a_0^2 H_0^2}$.

$$P_{\delta\sigma}(\beta \lesssim a_0 H_0) \approx \left(\frac{H_\lambda}{2\pi}\right)^2; \quad K = 0, \quad (19)$$

$$P_{\delta\sigma}(\beta \lesssim a_0 H_0) \approx \left(\frac{H_\lambda}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{1 - \frac{|K|}{a_0^2 H_0^2}}\right); \quad K < 0, \quad (20)$$

para universos cerrado, plano, y abierto respectivamente, en donde se ha definido $H_\lambda \equiv \sqrt{\rho/3m_p^2}$ siendo ρ la densidad de energía del Universo durante inflación. Las expresiones (18) a (20) corrigen un error de cálculo en las expresiones análogas presentadas en la Ref. (Massó et. al., 2006).

Se observa a partir de las ecuaciones (18) y (19) que para el caso del universo cerrado, $K > 0$, el espectro de potencias se suprime ligeramente con respecto al espectro de potencias del universo plano, $K = 0$. Para el caso del universo abierto, $K < 0$ (ecuación (20)), sucede lo contrario; el espectro de potencias se ve realzado ligeramente con respecto a aquél del universo plano. En el espectro angular C_l definido en la ecuación (16) el efecto de la supresión o realzamiento sólo es observable a grandes ángulos, correspondiente a multipolos bajos o l pequeño. Observacionalmente, como se deduce de la figura (1), se advierte una notable supresión para el cuadrupolo ($l = 2$). Lo anterior sugiere, teniendo en cuenta que el valor medido para $C_{l=2}$ está aún por fuera de la incertidumbre asociada a la varianza cósmica, que los tipos de curvatura característica de nuestro Universo más favorecidas por este último dato observacional son la plana ($K = 0$) y especialmente la cerrada ($K > 0$) (Efstathiou, 2003; Massó et. al., 2006).

3. Conclusiones

Aunque existen en la literatura numerosos modelos que permiten explicar las anomalías concernientes a los multipolos más bajos en el espectro angular C_l de las anisotropías en la temperatura de la RCF (véase por ejemplo Refs. (Abramo, Sodre Jr., & Wuensche, 2006; Jaffe et. al., 2005; Jaffe et. al., 2006; Kesden, Kamionkowski, & Cooray, 2003; Moroi & Takahashi, 2004; Piao, Tsujikawa, & Zhang, 2004; Yamazaki et. al., 2008)), la inclusión de la curvatura espacial del Universo para explicar la supresión de C_l en el cuadrupolo parece ser más natural, puesto que no es necesario incluir modificaciones a los modelos más simples de generación de estructuras. Además permite explicar por qué a grandes escalas existen mejores indicios de la curvatura, mientras que a escalas más pequeñas el Universo parece muy plano como lo sugieren las observaciones de C_l . Un análisis adicional que considera el efecto de la curvatura espacial sobre

la relación entre la dependencia del índice espectral en ζ con respecto a la escala y el mismo índice espectral se encuentra en progreso (Mariño & Rodríguez, 2008). Los resultados preliminares de este análisis parecen de nuevo favorecer la suposición de un Universo cerrado o plano, descartando en gran medida al Universo abierto.

Agradecimientos: Este trabajo cuenta con el apoyo de COLCIENCIAS a través del proyecto de investigación No. 1102-333-18674 CT-174-2006, y de la DIF (UIS) a través del proyecto de investigación No. 5134. Y.R. agradece al programa de intercambio de investigadores ECOS-NORD, proyecto No. C06P02.

Referencias

- Abbott L.F. & Schaefer R.K., 1986. A general, gauge-invariant analysis of the cosmic microwave anisotropy, *Astrophys. J.* **308**, 546.
- Abramo L.R., Sodre Jr. L., & Wuensche C.A., 2006. Anomalies in the low CMB multipoles and extended foregrounds. *Phys. Rev. D* **74**, 083515.
- Bardeen J.M., 1980. Gauge invariant cosmological perturbations. *Phys. Rev. D* **22**, 1882.
- Dodelson S., 2003. *Modern cosmology*. Academic Press, San Diego USA.
- Efstathiou G., 2003. Is the low CMB quadrupole a signature of spatial curvature?. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **343**, L95.
- Enqvist K. & Sloth M.S., 2002. Adiabatic CMB perturbations in pre big-bang string cosmology. *Nucl. Phys. B* **626**, 395.
- Harrison E. R., 1967. Normal modes of vibrations of the Universe. *Rev. Mod. Phys.* **39**, 862.
- Hinshaw G. et. al., 2008. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: data processing, sky maps, & basic results, arXiv:0803.0732 [astro-ph].
- Jaffe T.R. et. al., 2005. Evidence of vorticity and shear at large angular scales in the WMAP data: a violation of cosmological isotropy?. *Astrophys. J.* **629**, L1.
- Jaffe T.R. et. al., 2006. On the viability of Bianchi type VIII models with dark energy. *Astrophys. J.* **644**, 701.
- Kesden M.H., Kamionkowski M., & Cooray A., 2003. Can cosmic shear shed light on low cosmic microwave background multipoles?. *Phys. Rev. Lett.* **91**, 221302.
- Kolb E.W. & Turner M.S., 1990. *The early Universe*. Addison-Wesley Publishing Company, Redwood City USA.
- Komatsu E. et. al., 2008. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological interpretation, arXiv:0803.0547 [astro-ph].
- Liddle A.R. & Lyth D.H., 2000. *Cosmological inflation and large-scale structure*. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Lyth D.H., 1985. Large-scale energy density perturbations and inflation. *Phys. Rev. D* **31**, 1792.
- Lyth D.H. & Seery D., 2008. Classicality of the primordial perturbations. *Phys. Lett. B* **662**, 309.

- Lyth, D.H., Ungarelli C., & Wands D.**, 2002. The primordial density perturbation in the curvaton scenario. *Phys. Rev. D* **67**, 023503.
- Lyth D.H. & Wands D.**, 2002. Generating the curvature perturbation without an inflaton. *Phys. Lett. B* **524**, 5.
- Mariño G.A. & Rodríguez Y.**, 2008. In preparation.
- Massó E. et. al.**, 2006. Imprint of spatial curvature on inflation power spectrum. [arXiv:astro-ph/0609349v4](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0609349v4).
- Moroi T. & Takahashi T.**, 2001. Effects of cosmological moduli fields on cosmic microwave background. *Phys. Lett. B* **522**, 215; Erratum *ibid* 2002. B **539**, 303.
- Moroi T. & Takahashi T.**, 2004. Correlated isocurvature fluctuation in quintessence and suppressed CMB anisotropies at low multipoles. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 091301.
- Mukhanov V.F.**, 2005. *Physical foundations of cosmology*. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Mukhanov V.F., Feldman H.A., & Brandenberger R.H.**, 1992. *Theory of cosmological perturbations*. Part 1. Classical perturbations. Part 2. Quantum theory of perturbations. Part 3. Extensions. *Phys. Rep.* **215**, 203.
- Nolta M.R. et. al.**, 2008. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: angular power spectra, [arXiv:0803.0593 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/0803.0593).
- Piao Y.-S., Tsujikawa S., & Zhang X.-M.**, 2004. Inflation in string inspired cosmology and suppression of CMB low multipoles. *Class. Quantum Grav.* **21**, 4455.
- Sachs R.K. & Wolfe A.M.**, 1967. Perturbations of a cosmological model and angular variations of the microwave background. *Astrophys. J.* **147**, 73.
- Weinberg S.**, 2008. *Cosmology*. Oxford University Press, Oxford UK.
- Yamazaki D.G. et. al.**, 2008. Effects of a primordial magnetic field on low and high multipoles of the CMB. *Phys. Rev. D* **77**, 043005.

Recibido: febrero 3 de 2008.

Aceptado para su publicación: septiembre 18 de 2008.

LA GEOMETRÍA COMPLEJA SINTÉTICA EN LA OBRA TEMPRANA DE JULIO REY PASTOR

Por

Luis Español González¹

Resumen

González, L. E.: La geometría compleja sintética en la obra temprana de Julio Rey Pastor. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(124): 381-402, 2008. ISSN 0370-3908.

Se describe en este artículo el modo en que la matemática de los elementos imaginarios, analíticos y geométricos, centraron los primeros objetivos de investigación del matemático español **Rey Pastor**. Se presta especial atención a su trabajo realizado en Gotinga el curso 1913-14, recogido en su libro *Fundamentos de la geometría proyectiva superior* (1916). Añadiendo axiomas al sistema de **Pasch**, desarrolló la geometría proyectiva compleja hasta demostrar el teorema fundamental de la geometría algebraica y dar una definición sintética de curva analítica. La obra de **Rey Pastor** en este campo geométrico tuvo escasa proyección en una época dominada ya por el método analítico.

Palabras clave: Historia de las matemáticas, Geometría proyectiva sintética, Geometría compleja, curva analítica, España, siglo XX, Julio Rey Pastor.

Abstract

The way how mathematics of analytic and geometric imaginary elements focused the early research goals of the Spanish mathematician **Rey Pastor** is described in this article. Special attention is paid to his work at Gotinga during the academic year 1913-14, collected in his book *Fundamentos de la geometría proyectiva superior* (1916). Adding axioms to **Pasch's** system, he developed synthetic complex geometry as late as to prove the fundamental theorem of algebraic geometry, and to give a synthetic definition of analytic curve. **Rey Pastor's** work in this geometric field had a weak projection, in a period in which the analytic method was dominant.

¹ Universidad de la Rioja, España. Correo electrónico: luis.espanol@unirioja.es

Key words: History of mathematics, Synthetic projective geometry, Complex geometry, Analytic curve, Spain, 20th century, Julio Rey Pastor.

Introducción

En torno a 1900, debido sobre todo a la evolución de la matemática alemana, se produjo un cambio profundo en los métodos y problemas propios de la investigación en matemáticas. Desde un país como España, en el que no estaban implantadas las innovaciones de la segunda mitad del siglo XIX que anunciaron la nueva mentalidad, este cambio coexistió con los esfuerzos que pretendían la puesta al día de la matemática nacional.

A partir de 1907, la Junta para Ampliación de Estudios (en lo sucesivo JAE) protagonizó una acción institucional muy significativa para la modernización científica del país, fomentando los estudios de posgrado en los centros europeos más avanzados. Uno de sus pensionados fue el matemático **Rey Pastor**², que se había formado en el marco del plan de estudios de 1900, dominado, en detrimento del análisis, por la geometría y, dentro de ella, por el método sintético. El inspirador de este plan fue **Torroja**³, veterano catedrático de la Universidad de Madrid, monopolizadora entonces del doctorado. Allí acudió **Rey Pastor** una vez terminada su licenciatura en Zaragoza (1908), publicando en 1910 de su tesis doctoral de geometría, realizada en la estela sintética de **Torroja**, aunque con cierta independencia de criterio. Inició así su carrera de investigador matemático con una orientación que ya estaba obsoleta, al margen de los nuevos desarrollos dominantes; no obstante, en sus trabajos sintéticos dejó la huella de su poderosa capacidad matemática.

La formación de **Rey Pastor** había alcanzado cotas de modernidad en Zaragoza bajo el influjo de otro catedrático veterano, **García de Galdeano**⁴, que realizó un enorme esfuerzo individual de actualización al margen del plan de estudios oficial, siendo el matemático español de esa época más en contacto con la vanguardia europea. Esta circunstancia no impidió que el joven **Rey Pastor** recibiera un fuerte impacto al conocer en directo la matemática en su proceso de creación, gracias a las pensiones que recibió de la JAE para perfeccionar

en Alemania su formación en análisis matemático y en geometría superior, lo que hizo a lo largo de los cursos 1911-12 (Berlín) y 1913-14 (Gotinga), sin continuidad después de la Primera Guerra Mundial.

Al incorporarse a la investigación puntera **Rey Pastor** se vio inmerso en una contradicción entre la atracción del análisis matemático y la necesidad de sacar partido de su formación geométrica sintética; entre su experiencia geométrica doctoral y la preparación de oposiciones a la cátedra de Análisis matemático, que fue la primera oportunidad que se le presentó para resolver su porvenir profesional. En el centro de esta contradicción se situaron los imaginarios. Por una parte, el análisis complejo era desde **Riemann** y **Weierstrass** el gran protagonista de la teoría de funciones; por otra, la geometría sintética no quería perder la pista del análisis para avanzar en el camino de geometría pura iniciado por **Staudt**. Así, en su primera década profesional, la segunda del siglo, el trabajo de investigación de **Rey Pastor** se refiere a aspectos diversos, analíticos y sintéticos, de la matemática de los imaginarios. Del lado geométrico, su preocupación básica está en la introducción de los métodos propios del análisis en la geometría sintética y en avanzar en este campo más allá de la parte elemental lineal y cuadrática, hacia las figuras de orden superior.

En este contexto se origina su libro *Fundamentos de la geometría proyectiva superior* [53] (en los sucesivos *Fundamentos*), de enfoque sintético, cuya tercera y última parte, dedicada a la geometría proyectiva compleja, que termina con el concepto de curva analítica, será explicada en la segunda parte de este artículo. Antes, en la primera parte de este trabajo, se dará una visión general del grado de implantación de los imaginarios analíticos y sintéticos entre los profesores de **Rey Pastor** y de las aportaciones originales de éste al tema en su década profesional española, hasta a su incorporación a la Universidad de Buenos Aires en 1921. Ocuparán la tercera parte algunos datos sobre la breve vida que tuvo esta línea de investigación iniciada por **Rey Pastor**, con

²**Julio Rey Pastor** (1888-1962). La biografía de este matemático español y argentino puede verse en [52, 40]. En [23] se relatan sus primeros años plenamente españoles, hasta 1920, la época que corresponde a este artículo. En las obras citadas se mencionan otras referencias biográficas.

³**Eduardo Torroja** (1847-1918). Sobre **Torroja** y su influencia en la geometría española véase [43] y también [32].

⁴**Zoel García de Galdeano** (1846-1924), catedrático en Zaragoza, primero de geometría analítica y luego de cálculo infinitesimal. Ha sido biografiado [31] por **M. Hormigón**.

apenas algunos desarrollos epígonos de sus *Fundamentos*, y ciertas reflexiones sobre la modernidad de estos desarrollos en relación con la evolución de la geometría compleja en el marco del paradigma dominante en la matemática internacional, que estará representado por ejemplos coetáneos que también bebieron en las fuentes de Berlín y Gotinga.

Tiempo atrás, allá por 1994, preparé un borrador que puede considerarse antecedente parcial de este trabajo, con una ayuda del Instituto de Estudios Riojanos (IER)⁵, y se lo di a leer a **Mariano Hormigón**, quien me pidió que lo publicara en *Llull, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, de la que era director. Pero nunca hice los arreglos pertinentes para pasar de un borrador a un artículo acabado, otras tareas más urgentes lo impidieron. En el IER quedó una noticia parcial del trabajo [17], a modo de justificante de la ayuda recibida, y en un libro homenaje a miembros del IER fallecidos [21] publiqué una colaboración deudora de aquel borrador; pero ninguna de estas breves referencias afectan al carácter inédito del trabajo que ahora presento. La década larga transcurrida no le ha restado interés, pues nada se ha publicado entretanto específicamente dedicado a analizar la relación de **Julio Rey Pastor**, un matemático complejo, con la matemática de los imaginarios, en versión analítica y sintética, en la época temprana de su producción científica.

In memoriam. Dedico este trabajo a la memoria de **Mariano Hormigón Blázquez**, maestro de la historia de la ciencia e impulsor de la disciplina en España⁶. Mi trabajo en este campo se debe en buena medida a su insistencia.

1. Rey Pastor y la matemática de los imaginarios

A partir de **Argand**, los números complejos se convirtieron en tema de estudio para los matemáticos. Por una parte **Cauchy** inauguró la teoría de las funciones de variable compleja, mientras que **Gauss** y sus discípulos algebristas operaban con sistemas de números ampliados con la unidad imaginaria. Por otra, después de las intuiciones de **Poncelet** y **Chasles**, **Staudt** introduce

las involuciones elípticas orientadas como elementos geométricos correlativos a los números imaginarios.

No es exagerado decir que los imaginarios caracterizan la matemática del siglo XIX, especialmente en su segunda mitad. **Pierpont** lo expresó así en 1904 [50]:

“Sin duda uno de los hechos más característicos de las matemáticas en el último siglo es el uso sistemático y universal de la variable compleja ... ¿es probable que Poncelet, Steiner, Chasles, y von Staudt hubieran desarrollado la geometría sintética con tal elegancia y perfección sin su poderoso estímulo?”

El desarrollo analítico ha ido por delante y la geometría pura se ha esforzado en emular por vía sintética sus resultados, intentando llenar de significado geométrico el espacio ocupado en las demostraciones por los cálculos algebraicos. El rigor se implantó en el análisis, pero la geometría sintética permaneció intuitiva; llegó a ser rigurosa la parte lineal y cuadrática, pero la geometría de orden superior necesitaba recurrir al álgebra y al análisis en sus fundamentos.

Esta primera parte se divide en dos apartados, dedicado el primero a la formación que **Rey Pastor** pudo alcanzar en ambos campos del imaginarismo, y el segundo a su despegue como investigador entre los años 1910 y 1920, en el que jugó un papel nuclear el imaginarismo.

1.1. Formación universitaria. **Rey Pastor** estudió en Zaragoza según el plan de 1900, que planteaba una licenciatura de cuatro años, dos primeros comunes a otras especialidades científicas, impartidos por ello en todas la Facultades de Ciencias del país y otros dos más específicos que sólo se cursaban en Madrid, Barcelona y Zaragoza. Los dos primeros cursos incluían las asignaturas Análisis matemático 1º y 2º, Geometría métrica y Geometría analítica⁷. En las dos primeras, que incluían los temas básicos de álgebra clásica, se aprendían los números complejos y sus operaciones, y tal vez alguna idea sobre continuidad de los polinomios para explicar el teorema fundamental del álgebra. La geometría métrica era sintética, con un contenido euclidiano ampliado con elementos de proyectiva, y en el curso de geometría

⁵Instituto, dependiente del Gobierno de La Rioja, que ha apoyado constantemente mis investigaciones, ya extensas, sobre la vida y la obra del riojano **Julio Rey Pastor**, nacido en Logroño, la capital riojana. Véase [14, 15, 18].

⁶Para conocer la figura de **Mariano Hormigón** (1946-2004) véase la breve nota necrológica [22] y el libro homenaje [71]. A él se debe la terminología sobre paradigmas matemáticos usada en este artículo, véase [30].

⁷Además de Química general y Física general.

analítica podían estudiarse los elementos complejos del plano y el espacio.

Con este bagaje se estudiaba en 3º Cálculo infinitesimal y Geometría de la posición (proyectiva sintética), para terminar en 4º con dos asignaturas aplicadas, Mecánica racional y Geometría descriptiva⁸. La naturaleza aplicada del año final de la carrera indica su adscripción al paradigma lagrangiano que se extinguía, en el que primaba la aplicabilidad de la matemática. En cálculo y mecánica no se trataba la variable compleja, que quedaba ausente del plan de estudios, al igual que la geometría diferencial, vista sólo como breve aplicación del cálculo. La geometría de este segundo periodo era toda ella sintética, debido a la influencia de **Torroja**, el inspirador del plan de estudios, conocido como “el plan de las geometrías”.

Tenemos que considerar también los cursos de doctorado, un año adicional que sólo se impartía en Madrid, con tres asignaturas: Curso de Análisis superior, Estudios superiores de Geometría y Astronomía del Sistema Planetario. En análisis estaba a cargo de **Octavio de Toledo**⁹ y la geometría era de nuevo sintética, impartida por **Torroja**.

Veamos la formación que **Rey Pastor** obtuvo a través de este programa escolar y de la iniciativas adicionales que pudo tomar como estudiante muy aventajado que fue.

a) Geometría compleja. Cuando **Rey Pastor** afirmó que en 1890 la geometría española estaba en **Staudt** y que allí seguía veinticinco años después, se refería sin duda al libro de **Torroja** *Geometría de la posición* [67]. El autor sigue la línea trazada por **Reye** para la exposición didáctica de la obra staudiana real, pero mejora ampliamente al alemán en el tratamiento de los elementos imaginarios, como menciona **Rey Pastor** en una nota bibliográfica incluida en su libro *Fundamentos*:

“El único tratado de nosotros conocido donde se expone completamente la teoría de **Staudt**, incluso la proyectividad compleja, es el de **Torroja**”. [F. 340]¹⁰

Unos años después publicó *Teoría general de las líneas alabeadas y de las superficies desarrollables* [68], que era el texto base de su asignatura de doctorado. En este libro se estudian las curvas en el espacio obtenidas como intersección de cuádricas, teniendo como base la clasificación de las cuádricas según **Staudt**. El contrapunto métrico o analítico¹¹ a las enseñanzas proyectivas sintéticas de **Torroja** lo ponía **Vegas**¹² con su libro de texto *Tratado de geometría analítica* que tuvo una segunda edición renovada en dos volúmenes los años 1906 y 1907, en la que se acentúa el paralelismo con el libro sintético de **Torroja**. Las obras de ambos autores tienen como características la falta de bibliografía y de propuestas para estudios más avanzados.

Para hacer el doctorado **Rey Pastor** optó por la geometría sintética frente al análisis matemático, al que se incorporó en los años siguientes. Bien pudo influir en la elección el hecho de que la posición de **Torroja** era dominante en la matemática española del momento, algo importante para un estudiante brillante con prisa para alcanzar una posición profesional a causa de su situación familiar, pues era huérfano de padre desde 1906. Además, el estudiante **Rey Pastor** tuvo gran admiración por la agudeza matemática de su profesor de geometría de los últimos cursos, **Álvarez Ude**¹³. Otro dato a favor de la geometría como opción doctoral de quien finalmente fue un destacado analista pudo ser su relación con **S. Cámara**, que estudiaba en Zaragoza dos cursos por delante y compartía con él una actividad de clases particulares mientras preparaba el doctorado¹⁴. **Rey Pastor** tuvo que conocer bien la tesis doctoral de **Cámara**, *Apuntes para la teoría geométrica de la línea cíclica*, que sigue el más puro estilo sintético de **Torroja**, pero se detiene impotente ante problemas

⁸En estos dos últimos cursos se cursaban también las asignaturas Cosmografía y Física del Globo, y Astronomía esférica y Geodesia.

⁹**Luis Octavio de Toledo Zulueta** (1857-1934), véase [48]. Sobre el doctorado véase [12].

¹⁰Citaremos repetidamente fragmentos de *Fundamentos*, indicando con [F. n] una cita de la página n.

¹¹Hasta tal punto estaba subordinada la geometría analítica a la sintética, que las tesis doctorales de tipo analítico no pasaban del aprobado, mientras que las de estilo sintético se calificaban con sobresaliente. Véase [13].

¹²**Miguel Vegas** (1865-1943), también catedrático de la Central y discípulo de **Torroja**.

¹³**José Gabriel Álvarez Ude** (1876-1958), el más notable discípulo de **Torroja**, cuya cátedra en Madrid ocupó al jubilarse el maestro.

¹⁴**Sixto Cámara Tecedor** (1886-1964). Realizó oficialmente el doctorado en Madrid, pero sin dejar de residir en la capital aragonesa, donde tenía su destino como oficial de infantería. Se doctoró el 26 de junio de 1908, al tiempo que su joven amigo Julio terminaba su licenciatura. Véase [10, 11].

¹⁵La tesis de **Cámara** defendida en 1908 y publicada con un título algo distinto [5], daba la versión sintética de algunos resultados analíticos de **Darboux** [9].

proyectivos métricos que necesitan el uso de elementos imaginarios, inabordables desde el método sintético¹⁵. El reto de disponer de una teoría sintética del imaginario geométrico quedaría grabado en la mente del joven matemático.

Poco antes de la tesis de **Rey Pastor**, en junio de 1909, sus profesores geómetras de Madrid fueron protagonistas en la Academia de Ciencias. **Vegas** ingresó en ella con un discurso sobre la *Interpretación geométrica del imaginarismo* [70] y **Torroja** se encargó del discurso de contestación haciendo un resumen de la situación de los conocimientos que había en España sobre la geometría compleja. Ambos discursos reflejan un alto grado de autocomplacencia por parte de los personajes hegemónicos de la geometría nacional, que no planteaban opciones de actualización y progreso. Su discípulo no tardó en poner remedio a esta situación, aunque su actuación no estuvo exenta de algunas contradicciones, como más adelante veremos.

Rey Pastor utilizó en su tesis, *Correspondencia entre formas de primera categoría y aplicación al estudio de algunas de segunda*¹⁶, los elementos imaginarios a la manera de **Staudt**, siguiendo a **Torroja**, para estudiar la construcción sintética de curvas de orden superior mediante una teoría de correspondencias basada en un principio fundamental, que renuncia a demostrar geométricamente porque su prueba sólo es posible usando el teorema fundamental del álgebra, el cual a su vez necesita los recursos del análisis. Como es característico de la geometría del programa oficial español [43], la tesis, siendo brillante en su contexto nacional, versó sobre una materia anticuada desde el punto de vista internacional, como se aprecia de inmediato observando las referencias en que se apoya.

b) **Análisis complejo**. Como su antiguo alumno **Rey Pastor** reconoció¹⁷, corresponde a **García de Galdeano** el mérito de haber importado a España la teoría de las funciones de variable compleja de **Cauchy**. La fecha que asigna **Rey Pastor** a esta efemérides es 1883, que es la de publicación del *Tratado de Álgebra* de **García de Galdeano** [25], que amplió con un segundo volumen en 1886. Esta obra contiene, entre otros temas, —hay que recordar la escasa distinción que se hacía en esa época entre álgebra y análisis— una exposición de

los elementos de la teoría de las funciones de variable compleja que actualizó en su voluminoso *Tratado de Análisis matemático* [26], en el que introdujo adelantos de la segunda mitad del XIX tomados de libros franceses. La publicación del *Tratado de Análisis matemático* en Zaragoza coincide con el inicio de la carrera universitaria de **Rey Pastor**, quien fue testigo directo y sin duda interesado cuando, en 1907, su profesor de cálculo infinitesimal publicó un libro de poco más de doscientas páginas titulado *Exposición sumaria de las teorías matemáticas* [27], en el que da una rápida visión de los temas que hubiera querido añadir al *Tratado* para formar, con otros previos a éste, la proyectada *Nueva enciclopedia matemática* que no pudo completar. El material sumario sobre funciones de variable compleja que allí se encuentra adentra al lector en la senda trazada por **Riemann** y **Weierstrass**, si bien los temas clave de la prolongación analítica y la representación conforme están tan sólo esbozados; este es el camino, preferentemente en la línea más geométrica de **Riemann**, que **Rey Pastor** siguió en sus estudios de posgrado en Alemania.

Otro libro al alcance de **Rey Pastor** fue la *Introducción al estudio de las funciones de variable compleja* de **Octavio de Toledo** [45] publicado también en 1907; esta obra trata el tema a un nivel similar al del *Tratado* de **Galdeano**, que cita como referencia, pero lo hace de modo monográfico y quizás por ello más organizado como texto. Ambos catedráticos escribieron sus libros a partir de otros extranjeros, sin participación activa en la investigación, con el propósito de mejorar la información científica nacional y promover los estudios matemáticos superiores, logrando unos libros que hubieran podido ser textos universitarios de introducción al tema razonablemente buenos; pero en ese momento la variable compleja no figuraba siquiera en el plan de estudios vigente, el “funesto plan de 1900” en palabras de **Rey Pastor**, que tuvo que seguirlo. Decía **García de Galdeano** al iniciar el prólogo del *Tratado*:

“Es difícil publicar una obra adaptada a los planes vigentes en las universidades españolas y al mismo tiempo conforme con el actual grado de desenvolvimiento científico... Las teorías que se han desarrollado con gran impulso en las naciones cultas, arrajando

¹⁶Defendida en 5 de julio de 1909 y publicada un año después con el nuevo título *Correspondencia de figuras elementales, con aplicación al estudio de las figuras que engendran*. Toda la obra geométrica de **Rey Pastor** fue analizada en la tesis doctoral de **Ana Millán** [41], realizada en la Universidad de Zaragoza bajo la dirección de **L. Español** y **M. Hormigón**.

¹⁷Discurso pronunciado en Valladolid, en 1915, ante la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias (en lo sucesivo AEPPC), que versó sobre la cultura matemática española. Sobre la AEPPC véase [2].

en sus planes de estudios universitarios, nos son por completo desconocidas”.

Por su parte, **Octavio de Toledo** quiso imitar el proyecto de **Galdeano** al publicar el libro antes citado como volumen primero de unos *Estudios de análisis matemático* que pretendían

“... vulgarizar el conocimiento de una multitud de teoremas de esta rama de la matemática, que tanto por no exigirse en los cursos de nuestras Universidades y Escuelas especiales, cuanto por tratarse incidental y poco sistemáticamente en la mayoría de las obras matemáticas que circulan en nuestro país son en éste poco conocidas y cultivadas”.

Por otra parte, en las obras de **García de Galdeano** pudo también **Rey Pastor** seguir la pista de opciones geométricas modernas en la línea del Programa de Erlangen de **Klein** y de los grupos de transformaciones de **Lie**, cuyo desarrollo analítico se decantaba ya hacia finales del siglo. Avanzar en la implantación en España del programa geométrico kleiniano fue otra de las líneas en las que **Rey Pastor** dio un gran impulso a partir de las iniciativas de su antiguo profesor zaragozano.

1.2. Actividad profesional. Una vez doctorado, el joven geómetra pasó a ser auxiliar de su maestro **Torroja** en la Universidad Central de Madrid. Del entorno temático de la tesis, publicada en 1910, extrajo **Rey Pastor** entre 1909 y 1911 varias publicaciones en revistas españolas y dos comunicaciones que presentó en el congreso de la AEPPC celebrado en Valencia (1910). Al año siguiente la asociación celebró congreso en Granada y allí acudió el neófito con comunicaciones de análisis, especialidad en la que también produjo algún artículo. Todo ello le permitió estrenarse como profesional y cimentar el prestigio que le llevaría a la cátedra en junio de 1911. La cátedra fue de análisis matemático, aunque su principal currículo era geométrico, pero su prestigio era tal, en plena juventud, que sin duda hubiera ganado cualquier otra, y obtuvo la primera a la que pudo presentarse.

Una vez resuelta su vida al llegar a catedrático, el salto adelante que dio fue iniciarse como investigador internacional, para lo que encontró unas condiciones favorables que no tuvieron las generaciones anteriores. La más decisiva fue la posibilidad de obtener pensiones de la JAE, fundada en 1907, para pasar cursos completos en los centros de investigación más adecuados a sus objetivos. Lo hizo dos veces antes de la Primera Guerra Mundial, en Berlín (1911-12) y en Gotinga (1913-14). El curso intermedio lo pasó en España, en la Universidad de Oviedo, desde donde se trasladó a Madrid, ganando una nueva oposición, en junio de 1913. Se verá en este apartado que, si algún ámbito de la matemática merece ser llamado a jugar un papel nuclear en la primera producción matemática de **Rey Pastor**, éste es la teoría de los imaginarios, tanto en su versión analítica como geométrica.

a) Geometría compleja. El problema del encuentro profundo entre la geometría sintética y el análisis, puesto de manifiesto en su tesis doctoral, será una de las preocupaciones constantes en esta primera etapa de **Rey Pastor**. Mientras estaba en Berlín, avanzó en la investigación sintética sobre curvas de orden superior iniciada en la tesis, preparando la memoria, *Teoría geométrica de la polaridad en las figuras de primera y segunda categoría* [57], con la que ganó en 1912 un concurso convocado por la Academia de Ciencias de Madrid¹⁸.

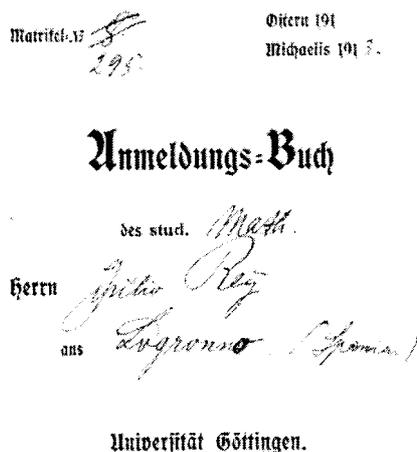
El primer capítulo de esta memoria es un resumen de la teoría de **Kötter** que, en particular, contiene la teoría sintética de los imaginarios y alguna de sus representaciones reales, con diversas llamadas a pie de página que remiten al estudio de los aspectos fundadores de la teoría que aparecerán en su obra *Fundamentos*, elaborada después de esta memoria pero publicada en primer lugar. En efecto, el manuscrito de *Fundamentos* recibió un premio de la Academia de Ciencias de Madrid en 1914 y se publicó en 1916. **Rey Pastor** presentó esta nueva obra como “fruto de la estancia del autor en las Universidades alemanas como Memoria de pensionado”.

Fundamentos tienen tres partes bien diferenciadas. La primera es una exposición general y completa de las geometrías de **Klein** y sus equivalencias, con la que perfecciona la introducción de este tema en España iniciada por **García de Galdeano**. **Rey Pastor** completó la difusión del *Programa de Erlangen* publicando versiones

¹⁸Sorprendentemente, no se publicó hasta 1929. La causa más probable es que su autor pensara remodelar el trabajo después de la investigación sobre los fundamentos de la geometría compleja que estaba iniciando. La Academia publicó la obra cuando el proyecto de reforma quedó definitivamente dejado de lado.

de esta primera parte en revistas españolas, argentinas e italianas entre 1916 y 1918.

La segunda parte de *Fundamentos* está dedicada a la geometría proyectiva real y la tercera a la compleja, ambas tratadas con el método sintético y edificada la última a partir de la anterior. Es en la tercera donde **Rey Pastor** realiza un profundo buceo en busca de los fundamentos de la geometría sintética de las curvas para mejorar el trabajo de **Kötter**¹⁹ y “vencer el punto trascendente” de la geometría, aquél que sólo se prueba usando el análisis. Pero en realidad sólo venció con la ayuda de la intuición geométrica espacial, en el espacio intuitivo y no en el abstracto, según sus propias palabras, como se verá más adelante.



Druck des Universitätsbuchdruckers von W. St. Köster.

Fig. 1. Registro de **Rey Pastor** en Gotinga

Rey Pastor redactó por sí mismo las dos obras anteriores durante sus pensionados, aprovechando las bibliotecas alemanas pero aislado, pues en las universidades alemanas ya no se ocupaba nadie de las curvas por método sintético. Conoció los planteamientos de la geometría proyectiva de fin de siglo, en particular de la compleja, a través de la *Encyklopädie* alemana de Taubner, que se empezó a publicar bajo la dirección de **Klein** en 1898 para sintetizar los avances de la matemática en el siglo XIX²⁰. **Rey Pastor** sólo menciona la *Encyklopädie* en la primera parte de *Fundamentos*, la referida a la geometría del *Programa de Erlangen*, donde cita el artículo que **Fano** dedica a los grupos continuos. El otro artículo que redactó **Fano**, también de 1907, en el que se exponen en paralelo los desarrollos de la geometría sintética y la analítica, lleva de la mano hasta **Kötter** y **Paolis**²¹, y también describe la teoría de los imaginarios desde **Staudt** hasta **Segre**, **Juel** y **Study**²²; unos y otros son puntos de partida para **Rey Pastor**. Este fascículo de **Fano** se complementa con el de **Schoenflies** dedicado a la geometría proyectiva, en el que se mencionan las mismas representaciones reales que considera **Rey Pastor** en la tercera parte de *Fundamentos*.

El estudio axiomático del espacio complejo iniciado en *Fundamentos* fue continuado de inmediato en la tesis doctoral de **Fernández Baños**, dirigida por **Rey Pastor** desde el Laboratorio y Seminario Matemático de la JAE. La tesis se leyó en 1915, mientras *Fundamentos* estaba en prensa, pero la publicación escrita [24], posiblemente ampliada, tardó dos años²³.

b) Análisis complejo.

Rey Pastor inició la investigación sobre análisis complejo cuando preparaba las primeras oposiciones, pues necesitaba la variable compleja para exponer adecuadamente algunos temas del programa de la asignatura de segundo curso relativos a las ecuaciones algebraicas. A tal efecto, presentó dos comunicaciones al congreso que celebró en Granada (1911) la AEPPC: una

¹⁹**E. Kötter** (1859-1922). Véase [37].

²⁰Se conoció en España sobre todo a través de la traducción francesa [44] iniciada en 1904, y más a partir de 1912 gracias a la difusión en la *Revista de la Sociedad Matemática Española*, sociedad fundada un año antes. Los fascículos de esta obra dedicados a cónicas y cuádras fueron citados por **García de Galdeano** en [27]. Sobre las revistas de esta primera época de la Sociedad Matemática Española véase [4].

²¹**R. de Paolis** (1854-1892). Véase [46].

²²**C. Segre** (1862-1930), véase [62, 63, 64, 65]. **S. C. Juel** (1855-1935), véase [33, 34]. **E. Study** (1862-1930), véase [66].

²³**Olegario Fernández Baños** (1886-1946), empezó geómetra y terminó siendo, desde 1934, el primer catedrático de Estadística matemática en la universidad española, con plaza en la capital. Véase su biografía en [39]. Leyó la tesis, titulada *Construcción de espacios complejos contenidos en E_n y sus representaciones reales*, el 6 de diciembre de 1915.

²⁴En las referencias finales sólo incluimos los libros de **Rey Pastor** más relacionados con este trabajo, para tener referencias precisas de los artículos y otras obras del autor que citemos remitimos al lector a los listados de la obra completa de **Rey Pastor** que se encuentran al final de [52] o de [14], este último elaborado por **E. Ortiz** y **M. Ortiz**.

se titulaba *Sobre la representación conforme* y la otra *El exceso algebraico y la teoría de ecuaciones numéricas*²⁴. Con el tiempo, estos temas pasaron a su libro *Lecciones de álgebra*, cuya primera edición fue en 1924. En la solicitud de pensión a la JAE el año 1911 aparece esta consideración²⁵:

“De las dos ramas principales de la Matemática, que son Análisis y Geometría, ha adquirido la segunda un considerable desarrollo en nuestro país, gracias a la introducción del método de Staudt por el sabio maestro Dr. Eduardo Torroja, hasta el punto de perjudicar el progreso del Análisis, que hoy se halla completamente estacionado.”

Obtuvo la pensión en septiembre y marchó a Berlín, donde siguió un curso de funciones analíticas de **Schwarz**, otro de funciones automorfas y poliédricas de **Schottky** y un tercero de ecuaciones algebraicas de **Schur**. Consecuencia de este año de formación especializada son dos trabajos —*Aplicaciones algebraicas de la representación conforme* y *Representación conforme de recintos espiriformes*, de los que sólo publicó el primero— que presentó al congreso de la AEPPC celebrado en Madrid en junio de 1913, al mismo tiempo que obtenía la cátedra de Análisis matemático de la Central. A mediados de julio, de nuevo pensionado por la JAE, marchó a Gotinga, donde recibió lecciones sobre representación conforme de **Carathéodory** y **Runge**. Regresó para iniciar en Madrid el curso 1914–1915, terminando así, a causa de la guerra, sus formación como investigador en Alemania.

Dos frutos inmediatos dejó para la matemática española esta segunda estancia: la comunicación *Resolución elemental del problema de Dirichlet para el círculo*, presentada al congreso de la AEPPC celebrado en Valladolid en 1915 y, sobre todo, el curso avanzado *Teoría de la representación conforme* impartido el mismo año en Barcelona, en el Instituto de Estudios Catalanes²⁶.



Fig. 2. Rey Pastor fotografiado en Zaragoza, hacia 1915

Dos frutos inmediatos dejó para la matemática española esta segunda estancia: la comunicación *Resolución elemental del problema de Dirichlet para el círculo*, presentada al congreso de la AEPPC celebrado en Valladolid en 1915 y, sobre todo, el curso avanzado *Teoría de la representación conforme* impartido el mismo año en Barcelona, en el Instituto de Estudios Catalanes²⁷.

Aquí terminó prácticamente su trabajo original en este campo de la representación conforme, aunque dictó cursos y dirigió alguna tesis en el Laboratorio Matemático de la JAE, particularmente la de **Pineda**, discípulo que aparecerá más adelante en este trabajo²⁸, pero también las de **Rodríguez Sanz** y **Orts Aracil**. En su viaje a Buenos Aires durante el curso 1917-18 dictó un curso introductorio²⁹, y también en Madrid dio un curso en 1919. Su último trabajo en esta línea fue la comunicación al Congreso Internacional de los Matemáticos celebrado en Bolonia en 1920, *Transformation conforme des aires infinies sur le plan ouvert*, que es una reescritura de la parte final del curso dado en Barcelona cinco años antes. En su posterior actividad investigadora, a partir de la segunda mitad de los años veinte, centrada sobre todo en la sumación de series divergentes [58], trabajó profusamente en prolongación analítica.

²⁵Tomada de pág. 12 del artículo de **J. M. Sánchez Ron** “Julio Rey Pastor y la Junta para Ampliación de Estudios”, en [15], 9-41.

²⁶**Terradas** le había pedido que trajera de Alemania información actualizada sobre la representación conforme, así se originó este curso que el propio **Terradas** redactó en catalán, demorándose su publicación un par de años [55]. Para la biografía de **E. Terradas Illa** (1883-1950) véase [60].

²⁷**Terradas** le había pedido que trajera de Alemania información actualizada sobre la representación conforme, así se originó este curso que el propio **Terradas** redactó en catalán, demorándose su publicación un par de años [55]. Para la biografía de **E. Terradas Illa** (1883-1950) véase [60].

²⁸**Pedro Pineda** (1891-1983). Véase su biografía en [28]. La tesis de **Pineda**, *Transformaciones conformes según el método de Bieberbach*, fue leída el día 19 de junio de 1917.

²⁹*Resumen de la teoría de las funciones analíticas y sus aplicaciones físicas*, publicado por el Centro de Estudiantes de Ingeniería de Buenos Aires en 1918.

1.3. La representación conforme analítica. Interesa ahora dar una sucinta descripción de algunos aspectos de los trabajos de **Rey Pastor** sobre la representación conforme en el marco del análisis complejo, luego le tocará el turno a los de naturaleza geométrica proyectiva.

Las tres comunicaciones a los congresos de la AEP-PC que fueron publicadas forman una unidad³⁰. En *Sobre la representación conforme* (1911) dio una “demostración directa del teorema de Cauchy por medio de las propiedades de la representación conforme”, siendo el referido “teorema de Cauchy” el que calcula el número de raíces de una ecuación $f(z) = P(x, y) + iQ(x, y) = 0$ contenidas en un recinto mediante el exceso algebraico de la fracción $\frac{P}{Q}$ calculado en el contorno del recinto. Luego, en *El exceso algebraico y la teoría de ecuaciones numéricas* (1911) utiliza la teoría del exceso y el teorema anterior para calcular el número de raíces reales contenidas en un intervalo. Finalmente, en *Aplicaciones algebraicas de la representación conforme* (1913) extiende lo anterior a raíces reales complejas contenidas en un recinto, usando la representación conforme mediante una estrategia que contempla dos etapas:

“1º Estudio general de la función algebraica entera en cada uno de los semiplanos determinados por el eje imaginario.

2º Aplicación a los recintos transformados de éstos por funciones algebraicas.”

Pasemos al curso avanzado de Barcelona *Teoría de la representación conforme*. Se dividió en siete conferencias con los siguientes títulos: *Propiedades de las funciones analíticas.*— *Representación conforme de recintos elementales.*— *El lema de Schwarz (1870) y sus aplicaciones.*— *Teoremas de Koebe y de Bieberbach.*— *Teorema de existencia de Riemann.*— *Principio de simetría de Schwarz. Método alternante. Representación conforme de recintos limitados por curvas analíticas.*— *Aplicación de la representación conforme al problema de Dirichlet.*— *Teorema general de la representación conforme.* En este curso las novedades no son los temas sino la forma de exponerlos, de acuerdo con los métodos más al día en la teoría de funciones, así lo manifestó el propio **Koebe** en la reseña del libro aparecida en el *Jahrbuch*³¹.

Interesa resaltar, a los efectos del tema que motiva este artículo, que la conferencia sexta trata del *principio de simetría de Schwarz* y de la simetría respecto de una curva analítica, asunto central en la definición proyectiva de la curva analítica, como luego se verá. En este problema el método usado es similar al resaltado a propósito del último de los artículos antes citados: se estudia la simetría respecto a un segmento rectilíneo y se usa la representación conforme para definir la simetría respecto del arco analítico imagen de dicho segmento. Si el segmento es el eje real, la simetría se asocia a la conjugación compleja, y simetría y conjugación se corresponden en la representación.

2. Las curvas en geometría sintética

Entre las nociones básicas que centraron la atención matemática de **Rey Pastor** ocupa un papel relevante la noción de curva, ya sea la curva continua $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^2$ de Jordan, la curva algebraica $f(x, y) = 0$, siendo f un polinomio con coeficientes reales o complejos, o bien, la más general de todas, la curva analítica con un parámetro real t ,

$$z = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots, \quad \frac{dz}{dt} \neq 0,$$

como la representó **Rey Pastor** en [55]. Estos tres tipos de curva son estudiados en *Fundamentos* en el marco de la geometría proyectiva sintética. En esta obra se propuso, entre otros objetivos,

“Llegar, con recursos exclusivamente geométricos, hasta introducir en esta ciencia el concepto de curva analítica proyectiva, que es el más general hoy poseído por el análisis”. [F. XX]

Rey Pastor culmina la obra logrando este objetivo—sin olvidar algunas consideraciones sobre el rigor que se harán más adelante— y afirmando:

“Y si no pareciera demasiado atrevido nuestro intento, anunciaríamos que la definición geométrica que logramos es más general y primitiva que la del Análisis, pues comprende por igual a los puntos propios e impropios, y con ella se define toda la curva, sin necesidad de las superposiciones y prolongaciones

³⁰ Así lo puso de manifiesto por primera vez el argentino **Pascual Llorente** [38].

³¹ Ref. JFM 45.1336.01.

que necesita el Análisis para obtenerla". [F. 428]

En el apartado siguiente daremos un rápido repaso al contenido de las dos primeras partes de *Fundamentos* para dedicar después más atención a la tercera parte dedicada a la geometría compleja, que culmina con el teorema fundamental de la geometría algebraica y la noción de curva analítica.

2.1. Viaje a los fundamentos. Los críticos de la época que hicieron recensiones públicas de *Fundamentos* consideraron atractivo y original el tratamiento dado por **Rey Pastor** a la geometría proyectiva sintética real y compleja, destacando entre ellas la de **Bieberbach** en el *Jahrbuch*³², que enjuicia la obra así:

"...El autor da, a partir del programa Erlangen de Klein y utilizando métodos puramente sintéticos, una brillante visión de conjunto de las ideas y métodos fundamentales de los temas que trata. Con frecuencia da nuevos resultados y, en muchos casos, métodos nuevos de demostración. Su análisis comparativo de las diferentes teorías de los imaginarios es particularmente exitosa. Además, el autor hace progresar el algoritmo de las colineaciones con su cálculo vectorial proyectivo. Traslada a la geometría proyectiva muchas nociones del análisis, como curva analítica, superficie de Riemann, representación conforme. Querría resaltar la bella demostración del principio de correspondencia de Jonquières-Chasles."

En efecto, la primera parte es una exposición experta pero sin aparato técnico, de muy notable ejecución en setenta páginas, de la noción de geometría definida por grupos de transformaciones y de las equivalencias entre geometrías así definidas. El espíritu kleiniano de esta parte impregna el resto de la obra, pero es independiente de ella; su presencia se justifica por la novedad que en esos años representaba todavía este enfoque en amplios sectores de la comunidad matemática europea, más todavía en la española.

La segunda parte de *Fundamentos* contiene la geometría proyectiva real en poco más de doscientas páginas. El enfoque es axiomático, dentro de la línea de las axiomáticas que dan importancia al aspecto *psicológico*, que pide que los axiomas reflejen la intuición geométrica, tendencia prehilbertiana basada en las ideas de **Klein** seguidas por **Pasch** y otros. Desde **Hilbert** se impuso el enfoque *lógico* que justifica los axiomas simplemente por su consistencia y, en menor medida, independencia. **Rey Pastor** dedica unas páginas de corte lógico al "espacio proyectivo abstracto de n dimensiones", sus incidencias y dualidades, pero la línea general de la obra, no exenta de disquisiciones laterales, transcurre en la axiomática psicológica a la manera de **Pasch**, **Peano**, **Moore** y **Schur**. Así, a partir de los conceptos primitivos de *punto* y *segmento*, construye la recta por prolongaciones, luego el plano, y finalmente el espacio mediante diez *axiomas gráficos* imbricados con las necesarias definiciones y los teoremas básicos. Además, demuestra con originalidad la independencia y compatibilidad de estos axiomas. Finalmente, construye el *espacio proyectivo* a la manera de **Klein**: añadiendo los *puntos impropios* definidos por radiaciones de rectas coplanarias a una región limitada del espacio dado previamente por los axiomas gráficos.

Una de las ideas que expresa el autor de *Fundamentos* es que la geometría sintética se agota si no incorpora las herramientas que hacen triunfar al análisis:

"...la rama proyectiva, y en especial el método sintético, han quedado relegados a segundo término... [porque] la total separación del Análisis ha contribuido al agotamiento de la Geometría... [que] podría tomar del Análisis las ideas que pueden ser útiles a su desarrollo, como éste toma de la Geometría las que convienen a su misión". [F. XVIII-XIX]

Afirma **Rey Pastor**, refiriéndose a los imaginarios, que "si exceptuamos la tendencia de **Study**, nada concreto de ha hecho todavía en este sentido", y así uno de los fines de *Fundamentos* es:

"...aportar a la Geometría proyectiva multitud de recursos que, á pesar de ser esencialmente geométricos, sólo en el Análisis han sido utilizados hasta ahora, como son: Teoría de conjuntos,

³²JFM 46.0880.02. Traducción propia.

Representación conforme, Superficie o plano múltiple de Riemann, etc." [F. XX]

Pero ya en la parte de geometría real empieza a realizar la introducción de cuestiones como la continuidad y la topología real (que llama teoría de conjuntos) en el espacio proyectivo. Para ello enuncia el siguiente *axioma de continuidad* (el número once, sumado a los diez axiomas gráficos del espacio inicial):

"Dados infinitos segmentos $\overline{AA_1}$, $\overline{AA_2}$, $\overline{AA_3}$, ..., tales que cada uno contiene al anterior, y todos ellos están contenidos en \overline{AB} , hay un segmento \overline{AL} interior a \overline{AB} , ó coincidente con él, que los comprende a todos, y tal que ningún otro segmento $\overline{AL'}$ interior a \overline{AL} cumple igual condición." [F. 163]

Apoyado en este axioma (y los diez anteriores) demuestra el teorema de **Cantor** de los intervalos encajados. Luego, a partir de la noción natural de *polígono proyectivo*, introduce la de *entorno de un punto* (polígono proyectivo que tiene al punto en su interior) y a partir de ella surgen puntos de acumulación y conjuntos, derivados, cerrados, perfectos, etc. La topología cantoriana en versión proyectiva sintética. Demuestra el teorema de **Bolzano** y el de **Borel** sobre finitud de cubrimientos, en este contexto por polígonos proyectivos. Ahora está en condiciones de definir las *correspondencias continuas* y con ellas el concepto proyectivo de *curva de Jordan*. La correspondencia continua la define por el método usual de entornos³³, dando este ejemplo:

"La correspondencia armónica respecto de un par MN es continua..." [F. 183]

Con la noción de correspondencia continua surge clara la definición de *curva de Jordan* y una de sus propiedades:

"... curva de Jordan: Conjunto de puntos en correspondencia biunívoca y continua con los puntos de un segmento." [F. 185] ...

"... Toda curva de Jordan (cerrada o abierta) es un conjunto cerrado." [F. 188]

Aunque a veces **Rey Pastor** trabaja sólo con conjuntos cerrados, también define un tipo de conjunto abierto que llama *recinto proyectivo*. Define la noción en el plano, pero añade que la definición se repite en cualquier espacio de dimensión $n \geq 2$. Un recinto proyectivo es un subconjunto del plano, distinto del plano total, con todos sus puntos interiores y *conexo*. Por conjunto conexo entiende que

"... entre dos puntos cualesquiera A, B , del mismo se puede trazar una línea quebrada de número finito de lados, formada por puntos interiores." [F. 187]

Más adelante, relaciona esta forma finita de conexión por segmentos con la conexión por caminos mediante este teorema:

"Si un conjunto formado por puntos interiores tiene la propiedad de que dos cualesquiera de ellos pueden unirse por una curva de Jordan perteneciente al conjunto, éste es un recinto." [F. 189]

Para completar el estudio del espacio proyectivo real aborda la teoría de la proyectividad. En este par de capítulos destacan dos temas. Por un lado el tratamiento del teorema fundamental de la recta proyectiva de **Staudt**, demostrado con todo rigor después de un análisis histórico de la demostraciones previas incompletas por defectos axiomáticos³⁴. El segundo logro importante es el *cálculo vectorial proyectivo*³⁵, un algoritmo original que permite al autor calcular con las versiones proyectivas de las semejanzas, ya sea respecto de un punto fijo Ω (métrica euclídea) o de una involución fija $\Omega\bar{\Omega}$ ³⁶ (métrica no euclídea). Los vectores son en este caso clases de equivalencias de segmentos (pares ordenados de puntos) definidas por superposición mediante proyectividades que fijan el punto Ω en un caso y la involución $\Omega\bar{\Omega}$ en otro. El caso de segmentos o vectores de primera especie (respecto de Ω) ya aparece desarrollado

³³Si habitualmente denota los puntos por A , denota un conjunto de puntos con el símbolo \bar{A} . Dados conjuntos \bar{A} y \bar{A}' , una correspondencia entre ellos se escribe $\bar{A} : \bar{A}'$.

³⁴Véase [42] para un estudio detallado de este asunto.

³⁵Véase [16] para un estudio más pormenorizado de este cálculo.

³⁶Esta notación se corresponde con la conjugación, pues se refiere a dar la involución por sus puntos fijos, que son uno conjugado del otro cuando son complejos.

por **Pasch** y **Schur**, pero el de segunda categoría (respecto de $\Omega\bar{\Omega}$) es original de **Rey Pastor**. Así se expresa el autor al final de su exposición de este cálculo:

“Sobre esta nueva teoría vectorial proyectiva, en que el vector aparece como representante de una colineación, no podemos citar ningún trabajo que a ella se dedique, ni siquiera en que se exponga esta idea. Precisamente á este nuevo cálculo vectorial debemos la mayor parte de los resultados que logramos en la tercera parte, sobre todo los relativos al punto trascendente de la Geometría algebraica.” [F. 288]

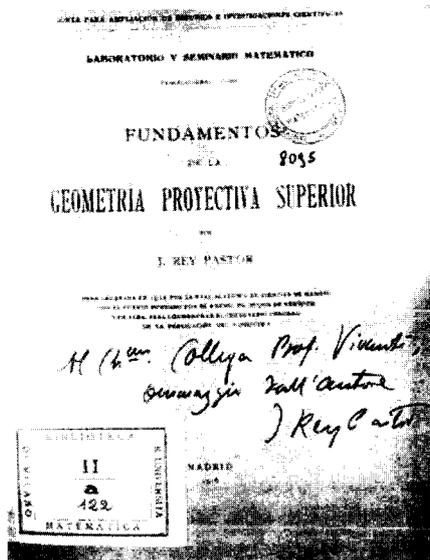


Fig. 3. Ejemplar de *Fundamentos* en la Universidad de Milán

2.2. El espacio proyectivo complejo. Llegamos a la tercera parte de *Fundamentos*, dedicada a la geometría proyectiva compleja. Son unas ciento cuarenta páginas divididas en cuatro capítulos cuyos títulos son: *El espacio complejo y la proyectividad compleja. La representación conforme proyectiva. Geometría proyectiva de las figuras algebraicas. El concepto de curva analítica proyectiva.*

La primera tarea es definir los elementos imaginarios, lo que hace para la recta y el plano siguiendo a **Staudt**, para quien un punto imaginario A^{37} es una involución elíptica (sin puntos dobles) más un sentido en la recta soporte, de modo que el sentido opuesto corresponde al punto conjugado \bar{A} .

“Para definir un punto imaginario basta dar dos pares de la involución, más el sentido correspondiente; éste queda fijado dando los cuatro puntos en el orden en que se presentan al recorrer la recta en dicho sentido. Así pues:

$$A \equiv ABCD \equiv BCDA \equiv CDAB \equiv DABC$$

$$\bar{A} \equiv DCBA \equiv ADCB \equiv BADC \equiv CBAD$$

Como los cuatro puntos de la cuaterna no son independientes, es posible fijar dos de ellos pertenecientes a \bar{A} distinto par. Cada punto imaginario queda así definido por un solo par de puntos, conjugados de aquellos dos fijos en la involución respectiva ...” [F. 293]

En el plano, las rectas imaginarias aparecen dualmente, como involuciones en haces. Hasta aquí el asunto está claro, pero a partir de la dimensión 3 hay que introducir colineaciones involutivas, lo que complica en exceso el imaginarismo geométrico. **Rey Pastor** generaliza la solución que **August** dio para el espacio tridimensional a una dimensión arbitraria, obteniendo que

“... hay $m + 1$ especies distintas de elementos imaginarios de m dimensiones.” [F. 299]

Ya no le dedica más atención al espacio complejo general, pues su objetivo en la obra se refiere al plano y a las curvas contenidas en él. **Rey Pastor** cierra el planteamiento abstracto general con este argumento:

“Como para el desarrollo de nuestro plan sólo necesitamos los elementos complejos de primera categoría, que se reducen, en resumen, á la involución sobre una recta, sólo éstos estudiamos con todo detalle en los artículos que siguen. Respecto del espacio complejo de n dimensiones, nos basta con haber llegado a obtenerlo, ofreciendo a los géómetras

³⁷Esta es la notación utilizada en *Fundamentos*, letras “mayúsculas griegas” que aparecen en negrita, como se vio antes con Ω .

españoles este nuevo campo de investigaciones que imperfectamente hemos roturado, en el cual podrán cosechar sin gran dificultad resultados importantes." [F. 300]

Después de definir a la manera de **Staudt** los elementos imaginarios, considera otros sistemas de definición, los de **Segre**, **Klein** y **Amodeo**, y los compara con el fin de utilizar uno u otro según le resulte conveniente; así por ejemplo, al explicar que **Klein** adopta la proyectividad cíclica en vez de la involutiva de **Staudt** para definir el punto imaginario de una recta real, dice:

"Para nosotros, como hemos adoptado el sistema de **Staudt**, este método de **Klein** y sus análogos nos dan nuevas representaciones de los elementos imaginarios, que relacionaremos con la de **Staudt**, porque su empleo puede ser útil en muchas ocasiones. Así, pues, no demostraremos con la proyectividad cíclica que hay una sola recta que une dos puntos, etc., pues esto ya lo hemos hecho partiendo de la definición de **Staudt**; nuestro problema es analizar cuál es la construcción de dicha recta con el nuevo recurso". [F. 303]

El siguiente tema que aborda es la representación real de las figuras complejas, de nuevo haciendo un análisis de las soluciones conocidas, de **Gauss**, **Staudt** y **Riemann**, y las relaciones entre ellas, que constituyen el fundamento de su teoría de la proyectividad compleja. Para estudiar esta proyectividad llama *hilos* a los conjuntos de elementos complejos (reales o imaginarios) cuya representación real sea un *continuo* (una curva en el caso de la representación plana de **Gauss**) y en particular son *cadena*s los hilos cuya curva asociada es una cónica en la representación plana. Estudiando estas figuras llega a un importante teorema:

"La representación plana o esférica de toda correspondencia biunívoca entre dos figuras complejas, que transforma cadenas en cadenas, es conforme." [F. 332]

Este teorema le permite llamar a las correspondencias biunívocas que conservan las cadenas de dos maneras: *proyectividades* si la representación conforme asociada

es *directa* y *antiprojectividades* si es *inversa*. Para terminar el capítulo, dedica unas páginas a estudiar la determinación y propiedades de estas correspondencias.

Este modo de definir la proyectividad (antiprojectividad) compleja difiere de los utilizados por **Juel** y **Segre**, que fueron los últimos que esbozaron un tratamiento geométrico de este tema hacia 1890.

Hasta aquí **Rey Pastor** ha procedido en *Fundamentos* de modo riguroso, si bien con explicaciones más bien ligeras, tratando de dar las primera ideas de los temas y dejando el desarrollo posterior para otros. En la introducción de la obra ya lo dejó claro:

"No siendo éste un libro de texto, no se busquen en él detalles que el lector puede completar; en muchas cuestiones ponemos solamente los jalones necesarios para que alguien emprenda la construcción completa; por eso titulamos *Fundamentos* y no *Tratado*." [F. XXI]

Pero a partir de aquí, en los tres capítulos que faltan, los temas no sólo se esbozan sino que la exposición se vuelve intuitiva y el autor recorre sin la precisión debida un camino que le lleva a resultados importantes pero necesitados de posterior consolidación, una tarea que ni él ni otros realizarían.

2.3. La representación conforme sintética. El propósito de rigor que persigue **Rey Pastor** se ve limitado a partir de este punto, al pasar de la geometría elemental plana a la superior, esto es, al abordar la representación conforme arbitraria y no sólo la lineal o cuadrática; así lo reconoce el propio autor:

"Hasta aquí, todos los problemas que hemos resuelto eran lineales o cuadráticos, y su desarrollo era fácil con método sintético; mas ahora entramos de lleno en el campo de las funciones arbitrarias, no expresables por medio de las funciones elementales del análisis, y la dificultad que en éste presentan, sube de punto cuando se quieren abordar con método sintético. Esta consideración, y la de tratarse de un tema completamente nuevo en geometría, hacen de este capítulo acreedor a la benevolencia del lector.

Así como la edificación axiomática del análisis no se ha logrado todavía para este género de cuestiones, y la moderna teoría de funciones, según Riemann, necesita en todo momento de la intuición geométrica, de igual modo el concepto de rigor en los capítulos que siguen, tiene significado muy distinto que en los anteriores. Ya no operamos en el espacio abstracto, en el cual edificamos la teoría de la proyectividad real, cuyo estudio puede hacerse con los símbolos de la Lógica formal; ahora nos referimos al espacio intuitivo." [F. 345-46]

Con estas limitaciones estudia las correspondencias conformes para con ellas atacar los dos últimos capítulos, dedicados a fundamentar en geometría sintética la noción de curva.

En este tramo final *Fundamentos* trata de geometría métrica plana en el marco proyectivo, es decir, del plano proyectivo real con el axioma de continuidad más una recta impropia ω destacada y en ella una involución elíptica con puntos dobles imaginarios conjugados Ω y $\bar{\Omega}$, de modo que la involución se representa por los puntos doble en un cierto orden: $\Omega\bar{\Omega}$. A partir del axioma de continuidad se definen las tangentes a las curvas y **Rey Pastor** puede llamar *conforme directa* a una correspondencia continua $(A_i) : (B_i)$ de un plano en sí mismo —que en general será multívoca— tal que los haces de rectas tangentes en cada dos puntos correspondientes A_i y B_i son proyectivos y a las rectas $A_i\Omega$ y $A_i\bar{\Omega}$ corresponden respectivamente las rectas $B_i\Omega$ y $B_i\bar{\Omega}$. Y se llamará *conforme inversa* si, en las mismas condiciones, al par $A_i\Omega, A_i\bar{\Omega}$ corresponde el par $B_i\bar{\Omega}, B_i\Omega$. Después puede caracterizar las correspondencias conformes mediante igualdades del cálculo vectorial proyectivo verificadas por los segmentos de segunda especie determinados por las tangentes en la recta fundamental ω . El cálculo vectorial proyectivo permitía también estudiar la *torsión* respecto de un centro O (que no es sino el equivalente proyectivo de la semejanza).

Por otra parte, con un proceso de paso al límite a lo largo de curvas cuyas tangentes engendran colineaciones, asocia a cada par A, B de puntos asociados en una correspondencia una torsión T *indicatriz* que sirve de instrumento para estudiar la correspondencia. Por ejemplo, las correspondencias conformes directas están

caracterizadas por ser T independiente de las tangentes elegidas para su definición en todos los pares de puntos homólogos. También asocia a cada par homólogo un punto C *derivado por diferencia*, probando que la correspondencia derivada por diferencia, es decir la que se establece entre A y C , es también conforme. Fijando un punto U además del centro de torsión O , asocia al par de puntos correspondientes A, B un nuevo punto B' que llama *derivado* y así puede obtener derivados sucesivos B'' etc., lo que le permite llamar puntos singulares de orden h a los puntos A que tienen coincidentes con O sus h primeros derivados. Buena parte del capítulo se dedica al estudio de estas correspondencias derivadas con las técnicas del cálculo proyectivo antes mencionado, para terminar con un teorema sobre el número de vueltas en los puntos singulares:

"Si el punto A es múltiple de orden h y B de orden k , cada rayo a del haz A tiene k rayos homólogos b en el haz B , y cada uno de éstos tiene h homólogos en el haz A . Al recorrer k veces a el haz A en sentido constante, cada uno de sus homólogos recorre el haz B en el mismo sentido, cubriéndolo h veces". [F. 367]

A lo largo de toda la obra, el autor había sido muy cuidadoso "en dar para cada cuestión una reseña bibliográfica, lo más completa posible en memorias fundamentales", pero en la bibliografía final de este capítulo afirma no haber

"... logrado encontrar memoria ninguna donde se introduzca la representación conforme en geometría, a pesar de ser un recurso esencialmente geométrico. El lector que desee proseguir nuestros modestos estudios condensados en este capítulo a modo de ensayo, habrá de inspirarse, por tanto, en las obras de los analistas. Como los trabajos existentes sobre la teoría de la representación conforme se ocupan principalmente del problema de Riemann, y por tanto, son de muy remota utilidad para el estudio del problema de la representación en pequeño, citaremos solamente la antigua obra Holzmüller. Einführung in die Theorie der isogonales Verwandtschaften.

Leipzig, 1882—, que puede reportar alguna utilidad para estas nuevas investigaciones geométricas que hemos iniciado, llamadas, según creemos, a extender el campo de esta ciencia en muy diversas direcciones”. [F. 368]

Por eso será también completamente original todo el remate del libro dedicado a la teoría sintética de las curvas, que se basa en la representación conforme.

2.4. Las curvas en modo geométrico. Los dos últimos capítulos de *Fundamentos* están dedicados al estudio de curvas, primero las algebraicas y finalmente las analíticas, que tan sólo alcanza a definir. En ambos casos las herramientas básicas para el estudio de estas figuras son las correspondencias. Entre ellas, **Rey Pastor** selecciona las que se relacionan con la representación conforme:

“Diremos que una correspondencia entre dos figuras complejas de primera categoría es $\left\{ \begin{array}{c} \text{analítica} \\ \text{antianalítica} \end{array} \right\}$ si la correspondencia existente entre sus representaciones reales es conforme $\left\{ \begin{array}{c} \text{directa} \\ \text{inversa} \end{array} \right\}$.

Esta definición encierra una propiedad de las figuras complejas en sí mismas, con independencia del sistema de representación elegido . . .” [F. 379]

Rey Pastor se ocupa de las correspondencias analíticas, porque una simple introducción de la conjugación permite trasladar los teoremas sobre éstas a otros correlativos para las correspondencias antianalíticas. No hay que olvidar que, desde el capítulo anterior, hay pasajes en los que el autor no desarrolla completamente sus ideas, dando tan sólo indicaciones del modo en que se debe proceder para exponerlas completamente.

Curvas algebraicas. **Rey Pastor** ya había trabajado con curvas algebraicas en geometría proyectiva sintética en su tesis doctoral de 1909. Allí las curvas estaban definidas por correspondencias (m, n) y para trabajar con ellas se admitía el principio de *Chasles-Jonquières*, al que **Rey Pastor** llamaba el “punto trascendente” de la teoría. Indicaba con ello que la geometría no tenía medios para demostrar dicho enunciado, por eso lo tomaba como principio; en cambio, dicho enunciado es

un teorema en geometría analítica, que se reduce al teorema fundamental del álgebra, cuya prueba es trascendente porque necesita recurrir al continuo del análisis.

Uno de los objetivos del autor en *Fundamentos* era vencer este punto trascendente que debió admitir como principio en su tesis doctoral. Para ello considera un tipo particular de correspondencias analíticas:

“Las correspondencias analíticas y antianalíticas más importantes son aquellas en que es finito y fijo el número de elementos de cada figura correspondientes a cada uno de la otra. Tales correspondencias se llaman algebraicas y antialgebraicas, respectivamente.” [F. 379]

Rey Pastor llama también a estas últimas *proyectividades superiores*, y las denota de esta forma:

$$(A_i) \overline{\wedge} (B_i) (m, n), \quad (A_i) \underline{\vee} (B_i) (m, n).$$

Como las correspondencias que definen las curvas son multívocas, **Rey Pastor** introduce la superficie de Riemann para estudiarlas reduciéndolas a correspondencias unívocas, como se hace en análisis. Explica el caso de la correspondencia $(2, 1)$ y luego indica las variantes que se deben introducir para que el método sirva con carácter general.

Entrando en materia, **Rey Pastor** aplica a una proyectividad superior (m, n) técnicas de representaciones reales mediante cuádricas, la superficie de Riemann de una de ellas y una correspondencia derivada por diferencias de la proyectividad superior, conceptos estudiados con anterioridad, y deduce un teorema general sobre el número de vueltas que da, en torno a un eje convenientemente prefijado, el homólogo C_i de un punto A_i en la correspondencia derivada $(A_i) : (C_i)$, cuando éste recorre el contorno de un recinto α . La aplicación importante de este teorema es el resultado perseguido por **Rey Pastor**:

“Teorema Fundamental de la Geometría Algebraica.— Una proyectividad de índices (m, n) , en una figura compleja de primera categoría, tiene $m+n$ elementos de coincidencia (contados cada uno tantas veces como indique

su orden de multiplicidad), ó todo elemento coincide con uno de sus homólogos." [F. 386]

Como corolario de este teorema fundamental, **Rey Pastor** prueba que la proyectividad compleja ordinaria, que había definido siguiendo a **Staudt** por el carácter biyectivo y la conservación de las cadenas, es un caso particular de la correspondencia analítica, basada en la condición de conformidad.

En la nota bibliográfica al final del capítulo **Rey Pastor** cita los dos intentos anteriores de superar el "punto trascendente" de la geometría algebraica. Del realizado por **Kötter** en 1887 dice que "sus demostraciones, penosas en grado sumo, son muy poco rigurosas, como consecuencia de la imperfección de la Geometría de entonces". No objeta falta de rigor a la demostración de **Paolis** de 1892, pero dice que el italiano llega a ella "en forma extraordinariamente complicada". **Rey Pastor** reivindica su método de prueba, muy distinto, y el uso que en él hace de la superficie de Riemann, "recurso esencialmente geométrico y, sin embargo, sólo utilizado por los analistas".

Curvas analíticas. Se aborda este apartado con el mismo criterio utilizado en el anterior, es decir, con el propósito de resumir la línea argumental que lleva al concepto proyectivo de curva analítica, sin entrar en detalles técnicos. **Rey Pastor** encuentra inspiración en la obra de **Study**, en la que la recta y la cónica reales se caracterizan geoméricamente mediante sus simetrías — la simetría ordinaria y la inversión respectivamente—. A partir de estos ejemplos básicos —y **Rey Pastor** no desarrolla otros— define la curva analítica a través de una simetría general, es decir, de una correspondencia continua conforme inversa; sin duda que al hacerlo así tuvo presente el principio de simetría de **Schwarz**, al que dedicó una de las conferencias analíticas sobre la representación conforme que pronunció en Barcelona (1915).

El recurso que permite a **Rey Pastor** enlazar con el principio de simetría es la *representación de Laguerre* de los puntos del plano complejo, que elige después de analizar en detalle las posibilidades de otro tipo de representaciones reales. **Laguerre** dio en forma analítica un método para representar cada punto complejo **A** del plano por dos puntos reales ordenados *A, B*. —lo que se escribe $\mathbf{A} \equiv \underline{AB}$ en *Fundamentos*— que son simétricos respecto a la recta real base del punto complejo que representan; de este modo, el punto complejo conjugado se representa en el mismo par de puntos reales, pero dado

en orden inverso, es decir $\overline{\mathbf{A}} \equiv \underline{BA}$. Como ejemplo más sencillo, si se trata de representar un punto complejo del eje real se obtienen los afijos de un número complejo y su conjugado, simétricos respecto al eje real. Pues bien, lo que hace **Rey Pastor** es introducir esta representación por vía sintética, realizando con fines técnicos algunas construcciones reales asociadas, como obtener el punto real de la recta compleja determinada por dos puntos complejos dados por sus pares reales representantes.

Con el fin de justificar el concepto de la curva compleja que define al final, **Rey Pastor** acude a nociones que encuentra en **Segre** y **Study**, a saber las de hilo y membrana, y las desarrolla en forma sintética. Un conjunto de puntos complejos es un *hilo* si sus representantes reales forman una curva —las cadenas, rectas y circunferencias en la representación geométrica ordinaria de los complejos, son un caso particular de hilos—, y es una *membrana* si se representa en una región del plano, que supone el plano entero para simplificar. **Rey Pastor** invita al estudio de estas figuras porque "no está hecho, ni siquiera iniciado" (dice además: "no dejaremos de llamar con insistencia la atención de los geómetras españoles sobre este nuevo campo de investigación que aquí se les ofrece, seguramente pródigo en resultados importantes") pero él se limita "a investigar la membrana en la proximidad de uno de sus puntos", buscando las condiciones de existencia de tangente única, que es la característica de las funciones analíticas. Para ello, toma todos los hilos que pasan por un punto de la membrana y estudia las tangentes a cada hilo a fin de aislar el caso en que todas ellas coincidan.

Para determinar la tangente a un hilo en un punto $\mathbf{A} \equiv \underline{AB}$ considera la correspondencia continua entre los pares de puntos reales representantes (según **Laguerre**) de los puntos complejos del hilo; así, mientras los puntos *A* recorren una curva real los puntos *B* hacen lo propio con otra. Además, asocia al hilo otras tres curvas reales y encuentra una notable variedad de relaciones geométricas entre las cinco curvas así obtenidas. Llama *determinación infinitesimal del hilo* en uno de sus puntos al conocimiento de los cinco puntos reales correspondientes, uno en cada curva, y a sus cinco tangentes respectivas, probando que la torsión de la correspondencia en el par *A, B* determina infinitesimalmente el hilo en dicho punto.

Con este estudio previo de los hilos y sus tangentes, está ya en condiciones de abordar los mismos temas con las membranas, estableciendo que "las tangentes en un

punto de una membrana a los infinitos hilos que pasan por él, forman, en general, un hilo de rectas complejas” (debe notarse que el hilo de rectas se define de modo dual o correlativo al hilo de puntos). Finalmente, demuestra que

“... la condición necesaria y suficiente para que todos los hilos de una membrana que pasan por cada punto de ella tengan la misma tangente, es que la correspondencia $(A_i) : (B_i)$ que define la membrana, sea conforme inversa en todos los pares $A_i B_i$.” [F. 424]

En el desarrollo de estas demostraciones juega un importante papel técnico el cálculo proyectivo repetidamente mencionado.

Llegados a este punto surge de manera natural la definición, en la que aparece el par fundamental del plano, pero de modo que aquélla es independiente de dicho par, pues se cambia de par mediante una colineación conforme. La definición anunciada y las primeras propiedades de la curva proyectiva compleja son:

“Curva analítica es el conjunto de puntos complejos $A_i \equiv \underline{A_i B_i}$, cuyos vectores representantes están determinados por una correspondencia $(A_i) : (B_i)$ continua, que es conforme inversa respecto del par fundamental $\Omega\bar{\Omega}$...”

a) La curva analítica tiene tangente única en cada uno de sus puntos; todos los hilos que pasan por el mismo, son tangentes entre sí.

b) La correspondencia $(B_i) : (A_i)$ inversa de $(A_i) : (B_i)$ define la curva analítica conjugada de ésta; la condición necesaria y suficiente para que la curva sea real, es decir, para que coincida con su conjugada, es que la correspondencia conforme inversa que la define, sea involutiva.” [F. 429]

Para terminar, **Rey Pastor** expone los ejemplos simples de **Study** y a partir de ellos aplica el nombre de simetría respecto de una curva analítica a la correspondencia conforme inversa que la define, de modo que

“... la simetría respecto de una curva analítica es una propiedad invariante respecto de todas las transformaciones conformes directas del plano”. [F. 431]

Si el análisis utiliza para definir la curva la existencia de tangente única para después obtener la simetría, la aproximación geométrica de **Rey Pastor** invierte el orden, tomando la correspondencia conforme inversa que luego se llama simetría como condición definidora. Aquí termina *Fundamentos*, una vez alcanzada la definición el autor deja para el futuro, de su mano o de las de sus discípulos, el desarrollo de una teoría sintética de la curva analítica en el plano proyectivo complejo.

2.5. Un proyecto contradictorio. Rey Pastor no volvió sobre el tema de la curva analítica proyectiva, más aún, con *Fundamentos* termina, salvo episodios menores³⁸, su obra escrita sobre geometría sintética, si bien es cierto que sus planes iniciales fueron otros:

“Si estos Fundamentos hallan acogida favorable, emprenderemos la publicación de otra obra, continuación de ésta, sobre Geometría proyectiva sintética de las figuras algebraicas”. [F. 401]

Esta segunda parte hubiera sido una reformulación de *Teoría geométrica de la polaridad* [57] a partir de los nuevos fundamentos. Pero el proyecto sintético no prosperó y esta nueva obra no fue realizada, de modo que el libro sobre la polaridad geométrica fue finalmente publicado por la Academia de Ciencias de Madrid en 1929 tal como había sido escrito en 1912.

No obstante, al escribir *Fundamentos Rey Pastor* tenía, además de sus objetivos geométricos, otra pretensión al servicio de la cual puso su amplio despliegue bibliográfico. La expresó así:

“De este modo pretendemos llenar otro fin, quizás más importante que los anteriores: presentando a los jóvenes matemáticos un cuadro del estado actual de esta ciencia; señalándoles los campos que aún están por cultivar, y donde pueden cosecharse frutos importantes, ahorrándoles las investigaciones

³⁸En Buenos Aires, principalmente con motivo de la fundación del Seminario Matemático Argentino en 1928, volvió a proponer investigación sintética como continuación de la planteada en Madrid la década anterior, pero no hubo trabajos relevantes.

bibliográficas, preliminar indispensable a todo trabajo matemático, y quizás la parte más penosa de él; en una palabra, orientándolos, quizás llegue a operarse un cambio en la dirección actual de los estudios geométricos en España". [F. XXI-XXII]

Asoma aquí la afiliación de **Rey Pastor** al movimiento renovador de la generación del filósofo **Ortega y Gasset**, que pretendía de modo muy principal la modernización científica de España³⁹ En este punto se hace patente la contradicción en que se movió **Rey Pastor**, pues sus dos memorias sintéticas premiadas por la Academia fueron escritas durante sus estancias Alemania, por lo que era conocedor de que en las universidades alemanas ya no se trabajaba sobre curvas por método sintético, así que no debió esperar que tuviera demasiado éxito su iniciativa pretendidamente modernizadora, y en todo caso su desarrollo sólo podría ser autárquico, al hilo de los conocimientos obtenidos en el plan de estudios oficial, pero sin contactos exteriores. Como afirmó en 1920, al final de su discurso de su investidura como académico ([56], pág. 20), sus viajes a Alemania le habían impulsado a

"...soñar que también la matemática viva, actualmente en elaboración por artífices eminentes que no es preciso citar, y en la cual colaboran en la medida de sus fuerzas profesores y alumnos universitarios de tantos países, llegaría a interesar a algunos de nuestros jóvenes, no inferiores en inteligencia ni aplicación a los de aquellas otras naciones".

Pero la geometría sintética ya no formaba parte de esa matemática viva, el impulso dado por **Torroja** a la geometría española, siendo cierto en su momento, había quedado obsoleto. La lista de eminentes investigadores que propone en el discurso del año 20 para importar sus teorías, "clásicos de la segunda mitad del siglo XIX, cuyos nombres, lanzados como un cartel de desafío a nuestra ignorancia por un benemérito maestro, desde su

cátedra provinciana", esa lista no apunta hacia la geometría sintética⁴⁰.

Parece poco probable que **Rey Pastor** no hubiera captado —en su puesta al día con la *Encyklopädie* de Taubner y en sus estancias en Alemania— la fuerza de los nuevos desarrollos analíticos en la geometría de las curvas y su conexión con los grupos de transformaciones, pues dirigió algunos trabajos sobre curvas *W* y analagmáticas. También es digno de mención que tras pasar por la universidad de **Hilbert** no se sintiera más atraído por su método axiomático más abstracto. Veamos para terminar un apunte de estas dos variantes en contrapunto a la dirección seguida por **Rey Pastor**.

Variante analítica. La geometría compleja evolucionaba mejor por el camino analítico, tendencia que se consolidó definitivamente cuando se generalizaron en la comunidad internacional, a partir de 1930, los métodos diferenciales de **Cartan**⁴¹ basados en las concepciones geométricas de **Riemann**, **Klein** y **Lie**. Pero esta línea evolutiva ya era notoria en **Segre** y **Study**, así que más bien parece que **Rey Pastor** se abandonó a la inercia sintética española y, necesitado de sacarle partido, se lanzó por esa vía e hizo lo propio con sus primeros estudiantes, que participaban de las mismas condiciones iniciales. Aunque pudo ser favorecida por el aislamiento ocasionado por la guerra, esta opción tuvo que ser en alguna medida consciente y de ahí la contradicción antes señalada.

Bajo la misma influencia de **Segre** y **Study** se estaba desarrollando un tratamiento de los mismos objetos matemáticos basado en conjuntos, grupos y funciones, los elementos básicos de la nueva matemática según las conferencias ateneístas⁴² de **Rey Pastor** en el año 1915. Esto no se le escaparía a **Rey Pastor**, que también sería consciente de la diferencia de modernidad que había entre las obras de referencia utilizadas en sus trabajos analíticos y los de su escuela frente a las disponibles para los sintéticos. Citemos como ejemplo de la variante analítica los trabajos de **Young**⁴³ sobre la geometría de las cadenas, publicados en 1909 y 1910, o la obra *The geometry of the complex domain* [7] de **Coolidge**, matemático norteamericano⁴⁴ que antes de instalarse en Harvard estudió, entre 1902 y 1904, con

³⁹Detalles sobre este asunto pueden verse en [20, 23].

⁴⁰El "benemérito maestro" aludido es **García de Galdeano**.

⁴¹**E. Cartan** (1868-1951). Véase [6].

⁴²Ciclo de conferencias en el Ateneo de Madrid, publicadas un año después [54].

⁴³**J. W. Young** (1879-1930). Véase [72, 73].

⁴⁴**J. L. Coolidge** (1873-1954). Conocido principalmente como autor de [8].

Segre en Turín y con **Study** en Bonn. En relación con la definición reypastoriana de curva analítica basada en la simetría de **Schwarz** respecto a la curva, deben sacarse a colación los trabajos [35, 36] de **Kasner** (1900 y 1913) sobre geometría conforme —el último de ellos es una comunicación al congreso internacional de Cambridge de 1912—; trabajos no mencionados por **Rey Pastor** que fueron publicados en revistas de amplia difusión, siendo más tarde incorporados por **Coolidge** a su libro de síntesis. El artículo de **Kasner** en Cambridge está dedicado a la búsqueda de invariantes del grupo conforme usando como herramienta la simetría respecto a curvas analíticas, así que pudo interesar a **Rey Pastor**. Mientras éste preparaba su investigación sintética, las ideas de **Kasner** tuvieron desarrollo en un artículo [49] sobre geometría conforme y curvas analíticas que **Pfeiffer** publicó en 1915, citado también por **Coolidge**. Un matemático muy bien informado como **Rey Pastor**, interesado en la geometría compleja, no podía desconocer la existencia de esta variante analítica. En efecto, menciona trabajos analíticos de **Segre**, **Study** y **Coolidge** en las referencias que da en *Fundamentos* para la equivalencia entre las diversas geometrías dadas por sus grupos de transformaciones, cuestión muy vinculada con las representaciones reales de elementos imaginarios.

Sea como fuere, esta variante analítica no atrajo a **Rey Pastor**, y varios de sus primeros discípulos realizaron⁴⁵ tesis doctorales sobre geometría sintética, línea de investigación que se desvaneció muy pronto. De hecho, los discípulos que se iniciaron en la geometría sintética no alcanzaron relevancia o llegaron a tenerla después de cambiar de especialidad. Resume esta situación la siguiente cita recogida del discurso que pronunció en 1956, próximo ya a los setenta años, con motivo de la recepción en la Academia de Ciencias de Madrid de su discípulo el brillante analista **San Juan**. Allí dejó escrito:

“A fines del siglo XIX damos un salto de gigante con la introducción de *Staudt*, más estudiado aquí que en Alemania; pero la geometría se enderezó

por el rumbo analítico, y tanto Cremona como Torroja y quienes lo seguíamos, quedamos una vez más fuera del cauce”.

Cinco años antes, en una “orientación bibliográfica” del libro *La matemática superior. Métodos y problemas del siglo XIX*⁴⁶ había escrito (pág. 101):

“En esta misma dirección sintética de Cremona propugnada en España por Torroja, están concebidas las tesis de Rey Pastor (1910) que reacciona contra este método; de Fernández Baños (1917) sobre imaginarismo en España; de Íñiguez Almech (1919) sobre correspondencias; y las monografías de Araujo (1920) sobre inversión y polaridad y de Pineda (1930) sobre colineación compleja”.

Con esta breve indicación **Rey Pastor** no precisa el alcance de su reacción ni tampoco las razones por las que esa reacción parece no haber sido seguida al menos por dos de los discípulos que cita, que son seguidores de *Fundamentos*. En efecto la tesis doctoral de **Fernández Baños** [24], dirigida por **Rey Pastor** en el Laboratorio y Seminario Matemático de la JAE, está dedicada a completar *Fundamentos* sobre la introducción de los elementos imaginarios en espacios de dimensión finita arbitraria, y la memoria de **Pineda** [51], más tardía⁴⁷, es todavía heredera directa de *Fundamentos*. En todo caso, estos trabajos, más que aportar grandes novedades, detallaron y completaron aspectos de la obra de **Rey Pastor**, y no alcanzaron la notoriedad de su maestro⁴⁸. En 1939 apareció un libro de **Amodeo** [1]⁴⁹, que historia desde un punto de vista interno la evolución de la geometría proyectiva sintética. El autor cita profusamente a *Fundamentos*, pero no menciona a ninguno de los dos discípulos citados. Más bien escasa y poco relevante fue por tanto la continuidad que tuvo esta línea de trabajo propuesta dentro de la incipiente investigación matemática española, y se pone además de manifiesto

⁴⁵En el Laboratorio y Seminario Matemático de la JAE, fundado en 1915. Sobre la investigación realizada en el Laboratorio véase [3]. **Rey Pastor** dirigió también allí, en estos primeros años, tesis doctorales sobre representación conforme y otros temas numéricos, financieros e históricos

⁴⁶**Rey Pastor** publicó este libro [59] en 1951, ampliando y actualizando sus conferencias del Ateneo de 1915 [54].

⁴⁷Aunque se publicó en 1930, con ella su autor ganó un concurso de premios de la Academia de Ciencias de Madrid en 1924. Llama la atención también la insistencia de la Academia en seguir dando relevancia a estos temas.

⁴⁸La tesis de **Íñiguez**, dirigida por **Álvarez Ude**, al igual que la monografía de **Araujo**, conectan con otros aspectos de la obra geométrica de **Rey Pastor**.

⁴⁹**F. Amodeo** (1859-1946). El mismo año se publicó en Rosario (Argentina) la traducción al castellano que realizó **Nicolás Babini**.

que, en concreto, nada se añadió al tema de la curva analítica proyectiva.

Variante axiomática. En el último capítulo de su libro sobre la geometría compleja, **Coolidge** expone la teoría de **Staudt** con el rigor lógico de la escuela hilbertiana, y hace notar allí que lo tradicional es suponer el espacio real y definir a partir de él los elementos complejos como ciertas figuras reales, pero que otra posibilidad es dar una axiomática global que introduzca a la vez los elementos reales y los complejos.

El camino tradicional es el seguido por **Rey Pastor** y su escuela, mientras que el segundo, sugerido por las ideas axiomáticas del momento, lo apuntaron en sus libros de geometría proyectiva **Veblen** y **Young** (1910,18) [69]⁵⁰, citados de pasada en *Fundamentos* en una nota a pie de página porque “se limitan a dar ligeras nociones” del espacio proyectivo complejo. **Rey Pastor** prefiere la exposición completa que hace **Torroja**, que él intenta modernizar axiomáticamente hasta **Pasch** y **Schur**⁵¹, pero sin entrar de lleno en la línea hilbertiana, de la que sólo menciona sus criterios para la independencia de axiomas y alguna otra cuestión general.

En todo caso, el primer volumen de **Veblen** y **Young** pudo haber sugerido a **Rey Pastor** un tratamiento axiomático de la geometría más abstracto, que al evitar los axiomas de orden y continuidad admite modelos analíticos sobre cuerpos también generales. Con este planteamiento, puede hacerse una geometría proyectiva abstracta tomando como axioma el teorema fundamental de la proyectividad, uno de los “puntos trascendentes” de **Rey Pastor**. Ya en el segundo volumen, los autores introducen nuevos axiomas de orden y continuidad para probar que el sistema algebraico de los puntos de una recta es isomorfo a los números reales, lo que permite probar el teorema fundamental anterior por ser la multiplicación real conmutativa. Añadiendo otro conjunto de axiomas a la geometría proyectiva general obtiene directamente la geometría compleja. Debe notarse que el tratamiento de la geometría compleja en el libro de **Veblen** y **Young** no se hace hasta el segundo volumen, publicado en 1918, después de aparecidos *Fundamentos* y la tesis de **Fernández Baños**.

Aceptar este esquema axiomático hilbertiano hubiera conducido a **Rey Pastor** hacia un enfoque diferente de sus “puntos trascendentes” de la geometría y el álgebra, pero estos fueron los objetivos centrales de su trabajo, que siempre quiso mantener apoyado directamente en los números reales, con lo que su geometría y su álgebra se encontraban desde el inicio de su exposición con la necesidad y la dificultad de tener que demostrar los teoremas fundamentales.

Los comentarios anteriores intentan ayudar a explicar la escasa vigencia que tuvo su proyecto investigador en geometría proyectiva sintética, tanto por su dificultad cuanto por ir contra la corriente de los tiempos. El importante esfuerzo inicial de **Rey Pastor** en este campo, aunque formaba parte de su proyecto modernizador, estaba más atado al pasado heredado de **Torroja** que quería superar que al futuro que él mismo llegó a vislumbrar desde sus años en Alemania. No parece equivocado pensar que **Rey Pastor** fue muy pronto consciente de que el camino sintético era un camino sin salida, pero avanzó por él hasta que agotó las rentas que podía producir en España⁵². Por otra parte, como le sucedió también con el álgebra⁵³, no aceptó algunos aspectos abstractos de la matemática del nuevo siglo.

Referencias

- [1] **F. Amodeo** (1936) *Origine e sviluppo della geometria proiettiva*. Napoli, Pellerano.
- [2] **E. Ausejo** (1993) *Por la ciencia y por la patria: la institucionalización de la ciencia en España en el primer tercio del siglo XX*. Madrid, Siglo XXI de España.
- [3] **E. Ausejo**, **A. Millán** (1989) “La organización de la investigación matemática en España en el primer tercio del siglo XX: El Laboratorio y Seminario Matemático de la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas (1915-1938)”. *LLULL, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 12(23), 261-308.
- [4] **E. Ausejo**, **A. Millán** (1993) “The Spanish Mathematical Society and its periodicals in the first third of the 20th century”. En **E. Ausejo**, **M. Hormigón** (eds.) *Messengers of mathematics: European mathematical journals 1800-1946*, Madrid, Siglo XXI de España, págs. 159-187.
- [5] **S. Cámara Tecedor** (1908/09) *Apuntes para la teoría geométrica de las líneas cíclicas de 4º orden y 1ª especie*. *Anales de la Facultad de Ciencias de Zaragoza*, 7 (1908) 161-173; 8 (1908) 217-232; 9 (1909) 1-61 (publicada exenta, Zaragoza, Tip. de E. Casañal, 1909).

⁵⁰**O. Veblen** (1880-1960). La obra de **Veblen** y **Young** es un trabajo sintético con complementos analíticos, elaborado en la línea axiomática de **Hilbert** y **Hesenberg**.

⁵¹**M. Pasch** (1843-1930). **F. Schur** (1856-1932). **Rey Pastor** había traducido con **Álvarez Ude** la obra de **Pasch** [47]. También era buen conocedor de la obra de **Schur** [61].

⁵²A él mismo y a sus primeros discípulos, que debían sacar partido de las enseñanzas mayoritarias recibidas en la universidad.

⁵³Véase [19].

- [6] **E. Cartan** (1931) *Leçons sur la géométrie projective complexe*. Paris, Gauthier-Villars.
- [7] **J. L. Coolidge** (1924) *The geometry of the complex domain*. Oxford, Oxford University Press.
- [8] **J. L. Coolidge** (1940) *A history of geometrical methods*. Oxford, Oxford University Press.
- [9] **G. Darboux** (1904) *Étude sur le développement des méthodes géométriques*. Paris, Gauthier-Villars.
- [10] **J. J. Escribano** (2004) *Sixto Cámara: biografía de un matemático*. Prólogo de **L. Español**. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos.
- [11] **J. J. Escribano** (2006) "El 'oficio de matemático' en la primera mitad del siglo XX: Sixto Cámara Tecedor". *La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española*, 9(1), 246-264.
- [12] **J. J. Escribano Benito, L. Español González, María Ángeles Martínez García** (2006) "El doctorado español en matemáticas entre 1900 y 1921". *LLULL, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 29, 37-50.
- [13] **J. J. Escribano Benito, L. Español González, María Ángeles Martínez García** (2006) "Tesis doctorales de geometría en España entre 1900 y 1921". En **J. A. Pérez Bustamante et al.** (eds.) *Actas IX Congreso SEHCYT*, Cádiz, SEHCYT / Universidad de Cádiz, págs. 233-246.
- [14] **L. Español González** (ed.) (1985) *Actas I Simposio sobre Julio Rey Pastor*. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos.
- [15] **L. Español González** (ed.) (1990) *Estudios sobre Julio Rey Pastor (1888 1962)*. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos.
- [16] **L. Español González** (1998) "Algunas cuestiones sobre los Fundamentos de la geometría proyectiva superior". En **L. Español** (ed.), *Estudios sobre Julio Rey Pastor (1888 1962)*. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos, págs. 379-397.
- [17] **L. Español González** (1996) "Rey Pastor y la noción geométrica de curva analítica". *Zubía*, 14, (Sec. Varia) 123-125.
- [18] **L. Español González** (ed.) (1998) *Matemática y Región: La Rioja. Sobre matemáticos riojanos y matemática en La Rioja*. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos.
- [19] **L. Español González** (1998) "Rey Pastor ante los cambios en el álgebra de su tiempo". En **L. Español** (ed.), *Matemática y Región: La Rioja*. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos, págs. 63-122.
- [20] **L. Español González** (2000) "Julio Rey Pastor y el espíritu del 98". En **E. Ausejo, María C. Beltrán** (eds.), *La enseñanza de las ciencias: una perspectiva histórica*, Zaragoza, SEHCTAR, Universidad de Zaragoza, págs. 169-203.
- [21] **L. Español González** (2000) "Julio Rey Pastor y la matemática de los imaginarios". En *Homenaje a Julio Luis Fernández Sevilla y Mayela Balmaseda Aróspide*. Logroño, IER, págs. 331-340.
- [22] **L. Español González** (2004) "Mariano Hormigón Blánquez, in memoriam". *LLULL, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 27, 502 504.
- [23] **L. Español González** (2006) "Julio Rey Pastor. Primeros años españoles: hasta 1920". *La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española*, 9(2), 545-585.
- [24] **O. Fernández Baños** (1917) *Estudio sintético de los espacios complejos de n dimensiones*. Madrid, JAE.
- [25] **Z. García de Galdeano** (1883) *Tratado de Álgebra*. Toledo, G. Juste.
- [26] **Z. García de Galdeano** (1904 05) *Tratado de Análisis matemático*. 5 vols. Zaragoza, Casañal.
- [27] **Z. García de Galdeano** (1907) *Exposición sumaria de las teorías matemáticas*. Zaragoza, Casañal.
- [28] **F. A. González Redondo, L. de Vicente Laseca** (2005) "El 'oficio de matemático' en España en el siglo XX: Pedro de Pineda y Gutiérrez (Puerto de Santa María (Cádiz), 2.XII.1891 - Madrid, 7.I.1983)". *La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española*, 8(3), 837-868.
- [29] **J. L. S. Hatton** (1919) *The theory of the imaginary in Geometry*. Cambridge University Press.
- [30] **M. Hormigón** (1996) "Paradigms in mathematics: a theoretical model for research into the history of mathematics". En *Paradigms and mathematics*, Madrid, Siglo XXI de España, págs. 1-113.
- [31] **M. Hormigón** (2004) "Una aproximación a la biografía científica de Zoel García de Galdeano". *La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española* 7, 282-294. (Antes en *El Basilisco*, 1984)
- [32] **M. Hormigón, A. Millán** (1992) "Projective geometry and applications in the second half of the nineteenth century". *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* 42(129), 269-289.
- [33] **S. C. Juel** (1885) *Bidrag til den imaginäre Linies og den imaginäre Plans Geometri*. Copenhagen (Diss.).
- [34] **S. C. Juel** (1890) "Über einige Grundgebilde der projectiven Geometrie". *Acta Math.* 14, 1 30.
- [35] **E. Kasner** (1900) "The invariant theory of the inversion group: geometry upon a quadric surface". *Trans. A.M.S.* 1, 430-498.
- [36] **E. Kasner** (1913) "Conformal geometry". *Proc. of the Fifth International Congress of Mathematicians, Cambridge 22 28 August 1912*, vol. 2, 81-87, Cambridge Univ. Press.
- [37] **E. Kötter** (1887) *Grundzüge einer rein geometrische Theorie der algebraischen ebenen Curven höherer Ordnung*. Berlin, Academia de Ciencias.
- [38] **P. Llorente** (1985) "Una presentación de la obra de Julio Rey Pastor en álgebra". En **L. Español** (ed.) *Actas I Simposio sobre Julio Rey Pastor*. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos, págs. 119-136.
- [39] **M. V. Martínez** (1995) *Olegario Fernández-Baños. Apuntes para una biografía*. Logroño, Gráficas Ochoa.
- [40] **A. Millán** (1988) *El matemático Julio Rey Pastor*. Logroño, Universidad de La Rioja / Instituto de Estudios Riojanos.
- [41] **A. Millán** (1990) *La obra geométrica de Julio Rey Pastor*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- [42] **A. Millán** (1990) "El teorema fundamental de la recta proyectiva en la obra Fundamentos de geometría proyectiva superior de Julio Rey Pastor". En **L. Español** (ed.) *Estudios sobre Julio Rey Pastor (1888 1962)*. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos, págs. 355-377.
- [43] **A. Millán** (1991) "Los estudios de geometría superior en España en el siglo XIX". *LLULL, Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*, 14, 117-186.
- [44] **J. Molik** (ed.) (1904 16) *Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*. Paris, Gauthier-Villars.
- [45] **L. Octavio de Toledo** (1907) *Introducción al estudio de las funciones de variable compleja*. Madrid, Murillo.

- [46] **R. de Paolis** (1892) "Le corrispondenze proiettive nelle forme geometriche fondamentali di 1.^a specie". *Mem. Acad. Torino* 42, 495-584.
- [47] **M. Pasch** (1913) *Lecciones de geometría moderna*. Madrid, JAE (Trad. **J. Rey Pastor** y **J. G. Álvarez Ude**, de la 2.^a edición alemana, 1913, 1^o de 1882).
- [48] **J. Peralta** (2005) "Octavio de Toledo, la sucesión de los promotores de nuestro despertar matemático". *La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española* 8, 528-547.
- [49] **J. Pfeiffer** (1915) "On the conformal geometry of analytic arcs". *Amer. J. of Math.* 37, 395-430.
- [50] **J. Pierpont** (1904) "The history of mathematics in the nineteenth century". *Bulletin of the American Mathematical Society* 11, 136-159.
- [51] **P. Pineda** (1930) *Estudio de la colineación compleja en el plano y representación real de la misma*. Madrid, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- [52] **S. Ríos, L.A. Santaló, M. Balanzat**, (1979) *Julio Rey Pastor, matemático*. Madrid, Instituto de España.
- [53] **J. Rey Pastor** (1916) *Fundamentos de la geometría proyectiva superior*, Madrid, Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas.
- [54] **J. Rey Pastor** (1916) *Introducción a la matemática superior*, Madrid, Corona.
- [55] **J. Rey Pastor** (1917) *Teoría de la representació conforme*, Barcelona, Institut d'Estudis Catalans.
- [56] **J. Rey Pastor** (1920) *Discurso leído en el acto de recepción*, Madrid, RACEFN.
- [57] **J. Rey Pastor** (1929) *Teoría geométrica de la polaridad en las figuras de primera y segunda categoría*, Madrid, Academia de Ciencias.
- [58] **J. Rey Pastor** (1931) *Teoría de los algoritmos lineales de convergencia y de sumación*. Universidad de Buenos Aires. Reedición de 2006, anotada y comentada por **E. Fernández Moral**, con estudios previos de **A. Durán** y **L. Español**. Logroño, Instituto de Estudios Riojanos.
- [59] **J. Rey Pastor** (1951) *La Matemática superior. Métodos y problemas del siglo XIX*, Buenos Aires - Madrid, Ed. Iberoamericana.
- [60] **A. Roca, J. M. Sánchez Ron** (1990) *Esteban Terradas (1883-1950): ciencia y técnica en la España contemporánea*, Madrid, INTA.
- [61] **F. Schur** (1909) *Grundlagen der Geometrie*. Leipzig.
- [62] **C. Segre** (1889-90) "Un nuovo campo di ricerche geometriche". *Atti della R. Accad. delle Scienze di Torino* 25, 276-301.
- [63] **C. Segre** (1890-91) "Un nuovo campo di ricerche geometriche". *Atti della R. Accad. delle Scienze di Torino* 26, 35-71.
- [64] **C. Segre** (1891) "Su alcuni indirizzi nelle investigazioni geometriche". *Rivista di Matematiche* 1, 42-46.
- [65] **C. Segre** (1892) "Le rappresentazioni reali delle forme complesse e gli enti iperalgebric". *Math. Ann.* 40, 413-467.
- [66] **E. Study** (1911) *Ebene analytische Kurven und zu ihnen gehörige Abbildungen*. Leipzig.
- [67] **E. Torroja** (1899) *Geometría de la posición*. Madrid, G. Juste.
- [68] **E. Torroja** (1904) *Teoría general de las líneas alabeadas y de las superficies desarrollables*. Madrid, I. Fortanet.
- [69] **O. Veblen, J. W. Young** (1910-18) *Projective geometry*. 2 vols., Boston, Ginn and Company.
- [70] **M. Vegas** (1909) *Interpretación geométrica del imaginarismo*. Madrid, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- [71] **M. A. Velamazán** (ed.) (2005) *Homenaje a Mariano Hormigón (1946-2004)*. Zaragoza, Fundación "Rey del Corral" de Investigaciones Marxistas / Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza.
- [72] **J. W. Young** (1909) "Two dimensional chains and the associated collineations in a complex plain". *Trans A.M.S.* 11, 280-293.
- [73] **J. W. Young** (1910) "The geometry of chains on a complex line". *Annals of Math.* Ser. 2, 51, 33-48.

Recibido el 19 de mayo de 2008

Aceptado para su publicación el 20 de junio de 2008

DESVIACIONES PRESENTADAS POR LA SOLUBILIDAD DEL NAPROXÉN EN MEZCLAS COSOLVENTES ETANOL + AGUA FRENTE AL MODELO LOGARÍTMICO-LINEAL DE YALKOWSKY Y ROSEMAN

Por

Diana P. Pacheco & Fleming Martínez*

Resumen

Pacheco, D. P. & Martínez, F.: Desviaciones presentadas por la solubilidad del naproxén en mezclas cosolventes etanol + agua frente al modelo logarítmico-lineal de Yalkowsky y Roseman. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(124): 403-410, 2008. ISSN 0370-3908.

En este trabajo se analizaron las desviaciones observadas en la solubilidad del naproxén en mezclas cosolventes etanol + agua a 25,0 °C, respecto a la ecuación de solubilidad logarítmica-lineal propuesta por Yalkowsky y Roseman. Se obtuvieron desviaciones negativas en composiciones cosolventes entre 0,0 y 0,3, expresadas en fracción volumétrica de etanol, y positivas entre 0,3 y 1,0, siendo las desviaciones positivas mayores en magnitud comparadas con las desviaciones negativas. Los resultados se discutieron en términos de las posibles interacciones soluto-solvente y solvente-solvente, especialmente las relacionadas con la estructura del agua y la hidratación hidrofóbica.

Palabras clave: naproxén; mezclas cosolventes; ecuación de solubilidad logarítmica-lineal.

Abstract

“Deviations from Yalkowsky-Roseman log-linear solubility equation for naproxen in ethanol + water cosolvent mixtures”. The deviations observed in the solubility of naproxen in ethanol + water cosolvent mixtures with respect to the logarithmic-linear model proposed by Yalkowsky and Roseman have been analyzed at 25.0 °C. Negative deviations were obtained in cosolvent compositions from 0.0 to 0.3 in volume fraction of ethanol and positive from 0.3 to 1.0, being the positive deviations greater in magnitude than the negative deviations. The results were discussed in terms of solute-solvent and solvent-solvent interactions, especially in terms of water structure and hydrophobic hydration.

Key words: naproxen; cosolvent mixtures; log-linear solubility equation.

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

Introducción

El naproxén (NAP) es un fármaco analgésico-anti-inflamatorio, derivado del ácido propiónico, y clasificado como anti-inflamatorio no esteroide (AINE), que es ampliamente utilizado en la terapéutica actual para el tratamiento sintomático de la artritis reumatoidea y en general, para todo proceso agudo o crónico relacionado con dolor e inflamación (Roberts II, L.J. & Morrow, J.D., 2001). En el mercado farmacéutico colombiano, el NAP se presenta como tabletas, cápsulas, polvo para suspensión, y además como suspensión preparada, para administración peroral. Así mismo, el NAP se presenta como inyectable en ampollas de 500 mg/5 mL (Rosenstein-Ster, E., 2004).

Relacionado con las diferentes formas de dosificación, es bien sabido que las formulaciones líquidas inyectables se caracterizan por suministrar una alta dosis de fármaco en un pequeño volumen de producto; por lo tanto, algunas propiedades fisicoquímicas tales como la solubilidad y los volúmenes ocupados por los principios activos y por los otros componentes en la solución se tornan muy importantes para el diseñador farmacéutico, ya que el conocimiento de estas propiedades, así como el adecuado manejo y de ser posible, la predicción de estos fenómenos, facilita enormemente la labor de este profesional durante su labor en el desarrollo de medicamentos (Jiménez, F. & Martínez, F., 1995).

Por lo anteriormente expuesto, específicamente en lo relacionado con la predicción de propiedades de los sistemas líquidos, en este trabajo se presenta un estudio fisicoquímico del efecto de la composición cosolvente sobre las desviaciones presentadas por el NAP en mezclas binarias solventes formadas por etanol (EtOH) y agua (W) a 25,0°C, respecto al modelo logarítmico-lineal de solubilidad, desarrollado por Yalkowsky, S.H. & Roseman, T.J. (1981). Este trabajo es una continuación del presentado previamente sobre el estudio del comportamiento del NAP y el ibuprofén (otro fármaco AINE estructuralmente relacionado con el NAP) en el sistema binario propileno-glicol + agua (PG + W) (Vargas E.F. *et al.*, 2007).

El sistema EtOH+W es el que presenta el más amplio uso en el diseño de formulaciones líquidas destinadas a la administración parenteral (Rubino, J.T., 1988), y además, ha sido bien estudiado desde el punto de vista fisicoquímico; en particular, los volúmenes molares parciales y de exceso (Jiménez, J. *et al.*, 2004; Resa, J.M. *et al.*, 2004) y algunas propiedades reológicas (Belda, R. *et al.*, 2004). Así mismo, los aspectos termodinámicos de solución del NAP (Pacheco, D.P. & Martínez, F., 2007) y de otros fármacos (Bustamante, P. *et al.*, 1995; Jiménez, J.A. & Martínez, F., 2006), así como

la predicción de la solubilidad de algunos otros fármacos, en este sistema binario cosolvente, han sido estudiados previamente (Romero, S. *et al.*, 1996).

Aspectos teóricos

En la literatura farmacéutica se han descrito diferentes métodos para estimar la solubilidad de varias clases de solutos en mezclas cosolventes, algunos de los cuales han sido ampliamente desafiados recientemente frente a la solubilidad experimental de ciertos fármacos (Jouyban-Gharamaleki, A. *et al.*, 1999; Nokhodchi, A. *et al.*, 2002).

Como se ha indicado previamente (Vargas E.F. *et al.*, 2007), uno de los modelos más simples para estimar esta propiedad en mezclas cosolvente-agua está basado en la regla de la mezcla algebraica, la cual, para el caso de fármacos no polares en una mezcla binaria adquiere la forma:

$$\log X_{2-Mix} = f \log X_{2-Cosolv} + (1-f) \log X_{2-Water} \quad (1)$$

donde X_{2-Mix} es la solubilidad calculada en la mezcla cosolvente considerada, $X_{2-Cosolv}$ es la solubilidad en el cosolvente puro, $X_{2-Water}$ es la solubilidad en agua pura, y f es la fracción volumétrica del cosolvente, la cual a su vez, es calculada asumiendo aditividad de volúmenes como:

$$f = V_{Cosolv} / (V_{Cosolv} + V_{Water}) \quad (2)$$

en la que, V_{Cosolv} y V_{Water} son los respectivos volúmenes de cosolvente y agua, respectivamente (Connors, K.A., 2002). La ecuación 1 es una forma práctica del modelo logarítmico-lineal desarrollado por Yalkowsky, S.H. & Roseman, T.J. (1981), y que tiene la forma:

$$\log S_{2-Mix} = \log S_{2-Water} + \sigma \cdot f \quad (3)$$

donde S_{2-Mix} y $S_{2-Water}$ son las solubilidades (expresadas en molaridad o fracción molar) en la mezcla cosolvente y en el agua, respectivamente, y σ es el factor de potencia cosolvente-solubilizante (disolvente) del respectivo sistema soluto-solvente. El término σ de la ecuación 3 ha sido correlacionado con diferentes índices de polaridad de los solventes, tales como el coeficiente de reparto octanol-agua, el parámetro de solubilidad de Hildebrand, y las tensiones interfaciales, entre otros (Rubino, J.T. & Yalkowsky, S.H., 1987). La ecuación 3 ha sido ampliamente utilizada en el estudio de diversos solutos de interés farmacéutico (Yalkowsky, S.H. & Roseman, T.J., 1981; Yalkowsky, S.H., 1999; Millard, J.W. *et al.*, 2002).

Sin embargo, experimentalmente se ha encontrado que el comportamiento de diferentes solutos lipofílicos se

desvía de esta sencilla regla aditiva, en particular si los cosolventes son anfipróticos. Específicamente, en el caso del sistema PG + W, **Rubino, J.T. & Obeng, E.K.** (1991) estudiando la solubilidad de algunas series homólogas de *p*-hidroxibenzoatos y *p*-aminobenzoatos de alquilo, encontraron desviaciones negativas a la ecuación 1 en mezclas ricas en agua, esto es, a bajas fracciones volumétricas de PG, y desviaciones positivas en las mezclas ricas de cosolvente. Puesto que estos investigadores encontraron cierta similitud en las desviaciones encontradas por los diferentes solutos, sugirieron que las interacciones cosolvente-agua son las principales responsables de estos comportamientos.

De acuerdo con esto, se planteó que los cosolventes pueden interactuar con el agua principalmente mediante dos mecanismos:

(a) La naturaleza orgánica de los cosolventes conduce a un tipo particular de interacción con el agua, la cual ha sido descrita como la formación de “témpanos” de agua alrededor de las porciones apolares del cosolvente, esto es, el efecto de la hidratación hidrofóbica. Puesto que este fenómeno depende de la capacidad del agua de formar uniones cohesivas con otras moléculas de agua, es de esperar que este tipo de interacción sea predominante a bajas concentraciones de cosolvente, en las cuales se tiene presente un exceso de moléculas de agua. Este fenómeno ha sido descrito por **Kimura F. et al.** (1975) en el estudio de las entalpías de transferencia de la 1-metil-2-pirrolidinona desde el agua hasta algunos alcoholes de cadena corta.

(b) En adición a los efectos hidrofóbicos, los grupos hidroxilo del PG pueden interactuar con el agua mediante enlaces de hidrógeno, por lo que se ha sugerido que a bajas concentraciones de los alcoholes de cadena corta, estos pueden aumentar la estructuración del agua a través de enlaces de hidrógeno, en adición a lo conseguido por el efecto hidrofóbico. Por lo tanto, los dos tipos de interacciones mencionadas anteriormente, que llevan a un aumento en la estructuración de agua, conducen a su vez a una disminución en las interacciones soluto-solvente, según se ha demostrado mediante estudios de calor de disolución en estos sistemas (**Kimura, F. et al.**, 1975). De otro lado, cuando la fracción de PG es alta, los enlaces de hidrógeno entre el cosolvente y el agua siguen estando presentes pero la estructuración del agua ha disminuido significativamente o ha desaparecido.

Parte experimental

Los materiales, equipos y aspectos procedimentales utilizados y seguidos en el presente trabajo fueron

presentados previamente en la literatura (**Pacheco, D.P. & Martínez, F.**, 2007), y correspondieron básicamente a lo siguiente:

Reactivos

Naproxén USP (**US Pharmacopeia**, 2005); etanol absoluto R.A. Merck; agua destilada, conductividad $< 2 \mu\text{Scm}^{-1}$; alcohol USP (**US Pharmacopeia**, 2005); tamiz molecular Merck (números 3 y 4); filtros Durapore® 0,45 mm Millipore Corp.; material aforado de vidrio.

Preparación de las mezclas cosolventes

Se prepararon mezclas binarias EtOH + W de composición desde 0,00 hasta 100,00% m/m de EtOH variando de 10,00 en 10,00% m/m, por pesada en una balanza digital de platillo externo, Mettler Toledo PB302 de sensibilidad $\pm 0,01$ g, estudiando así la solubilidad en los dos solventes puros y en nueve mezclas solventes.

Determinación de la densidad

La densidad de las mezclas cosolventes y de las soluciones saturadas se determinó utilizando un densímetro digital DMA 45 Anton Paar conectado a un termostato Magni Whirl Blue M a $25,00 \pm 0,05^\circ\text{C}$ según procedimiento descrito previamente (**Martínez, F. et al.**, 2002). El densímetro se calibró según las instrucciones del catálogo del equipo (**Anton Paar, K.G.**, 1980). Las soluciones se introdujeron en el tubo de vibración del equipo utilizando una jeringa plástica de 2 mL esperando hasta la estabilización de la lectura de densidad en la pantalla digital (precisión $\pm 0,0001 \text{ g cm}^{-3}$).

Determinación de la solubilidad

Se colocaron cantidades específicas de las diferentes mezclas EtOH + W y de los solventes puros en frascos de vidrio NP (No parenteral: Tipo IV (**US Pharmacopeia**, 2005) y en cada uno se adicionó un exceso de NAP; se taparon los frascos, se agitaron mecánicamente en un agitador Burell® Modelo 75 durante una hora y se colocaron en el baño termostático a $40,00 \pm 0,05^\circ\text{C}$ con agitación manual esporádica durante al menos 72 horas para acelerar el proceso de saturación. Posteriormente la temperatura se ajustó en $25,00 \pm 0,05^\circ\text{C}$ dejando las muestras durante al menos 24 horas para permitir la precipitación del exceso de fármaco disuelto.

Se tomaron muestras de las soluciones sobrenadantes, las cuales fueron filtradas para eliminar partículas sólidas no disueltas, determinándose la densidad siguiendo el

procedimiento mencionado anteriormente, para realizar la interconversión entre unidades másicas y volumétricas. Las muestras fueron diluidas gravimétricamente con alcohol USP (**US Pharmacopeia**, 2005) y analizadas por espectrofotometría UV en un equipo BioMate 3 Thermo Electron Corp. siguiendo una metodología analítica validada (**Pacheco, D.P.**, 2006). Todos los procedimientos indicados se realizaron al menos tres veces y los respectivos resultados fueron promediados.

Resultados y Discusión

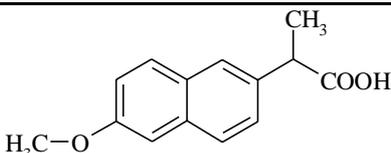
En la Tabla 1 se presentan los valores de algunas propiedades fisicoquímicas del fármaco en estudio, tomados de la literatura, mientras que en la Tabla 2 se presenta la solubilidad del mismo, expresada en molaridad y en fracción molar (en la mayoría de los casos el coeficiente de variación en solubilidad fue menor del 3,0%) en función de la proporción de EtOH en las mezclas, expresada en % masa/masa, fracción volumétrica y parámetro de solubilidad de Hildebrand, δ_{mix} . El valor δ está definido como la raíz cuadrada de la densidad de energía cohesiva y por lo tanto es una medida de la polaridad de los compuestos (**Martínez, F.**, 2005).

En la Tabla 2 se observa claramente que la solubilidad experimental se incrementa de forma no lineal con el incremento en la proporción de EtOH en las mezclas cosolventes. Además, la solubilidad del NAP en este sistema cosolvente es mayor que la obtenida en el sistema PG + W (**Vargas E.F. et al.**, 2007).

En la Figura 1 se presenta la solubilidad experimental del NAP expresada como el cociente logarítmico respecto a la solubilidad en agua. Los valores se suelen presentar de esta forma para poder evaluar el efecto relativo de la hidrofobicidad de los solutos sobre las tendencias respectivas. En este caso se obtiene un polinomio regular de tercer orden con coeficiente de determinación r^2 de 0,9963 considerando todos los puntos; sin embargo, si se consideran únicamente los valores obtenidos hasta la fracción 0,65 de EtOH (60% m/m), mejora notablemente la concordancia entre los valores experimentales y los calculados a partir del modelo polinómico regular de tercer orden así obtenido (en este caso el valor r^2 es 0,9987).

Modelos similares han sido presentados previamente en la literatura (**Machatha, S.G. et al.**, 2004) y han sido explicados en términos de la no concordancia entre los

Tabla 1. Algunas propiedades físicas y químicas del NAP.

Fármaco	Estructura molecular ^(a)	M / g mol ⁻¹ ^(a)	ΔH_{fus} / kcal mol ⁻¹ ^(b)	T_{fus} / K ^(b)	pK _a ^(c)	$\lambda_{\text{máx}}$ / nm ^(d)
NAP		230,26	7,53	427,6	4,2	271

^(a) Tomados de Budavari, S. *et al.* (2001); ^(b) Tomados de Perlovich, G.L. *et al.* (2004); ^(c) Tomado de Betageri, G.V. *et al.* (1996); ^(d) Determinado en alcohol USP (US Pharmacopeia, 2005).

Tabla 2. Solubilidad del NAP a 25,0°C expresada en molaridad y en fracción molar.

EtOH		δ_{mix} / cal ^{1/2} cm ^{-3/2}	NAP	
% m/m	<i>f</i>		Mol L ⁻¹	X ₂
0,00	0,0000	23,4	2.84 (0.06) × 10 ⁻⁴	5.13 (0.11) × 10 ⁻⁶
10,00	0,1236	22,1	3.58 (0.12) × 10 ⁻⁴	7.01 (0.23) × 10 ⁻⁶
20,00	0,2409	20,9	8.59 (0.10) × 10 ⁻⁴	1.824 (0.021) × 10 ⁻⁵
30,00	0,3524	19,7	3.807 (0.011) × 10 ⁻³	8.842 (0.026) × 10 ⁻⁵
40,00	0,4584	18,6	1.281 (0.015) × 10 ⁻²	3.28 (0.04) × 10 ⁻⁴
50,00	0,5594	17,6	3.33 (0.05) × 10 ⁻²	9.51 (0.13) × 10 ⁻⁴
60,00	0,6557	16,6	6.68 (0.04) × 10 ⁻²	2.160 (0.012) × 10 ⁻³
70,00	0,7476	15,6	0.1141 (0.0011)	4.222 (0.022) × 10 ⁻³
80,00	0,8355	14,7	0.1701 (0.0010)	7.30 (0.05) × 10 ⁻³
90,00	0,9195	13,8	0.2182 (0.0018)	1.100 (0.009) × 10 ⁻²
100,00	1,0000	13,0	0.2476 (0.0019)	1.494 (0.012) × 10 ⁻²

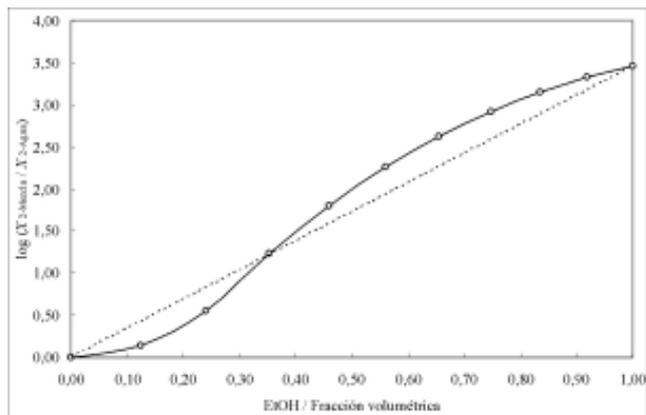


Figura 1. Variación del logaritmo decimal de la relación ($X_{2-Cosolv} / X_{2-Water}$) para el NAP en función de la proporción de EtOH a 25,0 °C.

valores de polaridad del fármaco y de las mezclas cosolventes. En el caso del NAP en mezclas EtOH + W se tiene que el valor δ del fármaco está muy por debajo del intervalo obtenido con las mezclas cosolventes (entre 13,0 cal^{1/2} cm^{-3/2} y 23,4 cal^{1/2} cm^{-3/2}), ya que el valor calculado por el método de contribución de grupos de **Fedors, R.F.** (1974) es 10,9 cal^{1/2} cm^{-3/2} (Tabla 3), lo que lo hace un compuesto relativamente poco polar. Con base en lo anterior podría pensarse que el comportamiento no lineal se debe a la gran diferencia existente entre los valores δ del fármaco y de las mezclas solventes.

De otro lado, en la Figura 2 se presentan las desviaciones presentadas en la solubilidad del fármaco respecto a lo estimado mediante la ecuación 1, encontrándose desviaciones negativas para composiciones que van desde el agua pura hasta la fracción volumétrica 0,30 de EtOH y positivas por encima de esta proporción de EtOH. Según la Figura 2, las máximas desviaciones se encuentran en fracciones 0,15 y 0,65 de EtOH para las negativas y las positivas, respectivamente.

Este comportamiento es diferente al encontrado con este mismo fármaco en el sistema PG + W, en el cual se

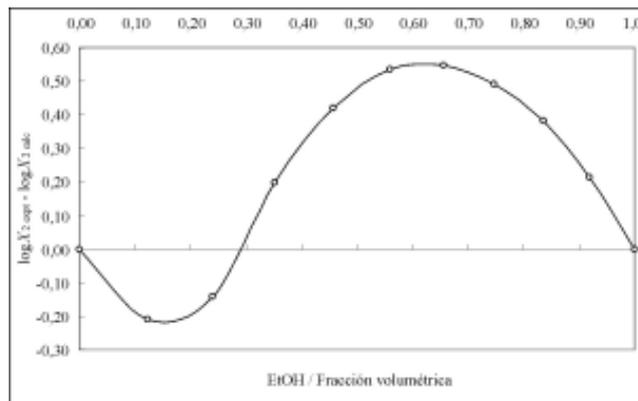


Figura 2. Desviaciones de la solubilidad experimental del NAP respecto a la linealidad en el sistema EtOH + W en función de la proporción de EtOH a 25,0 °C.

obtuvieron desviaciones negativas en todo el intervalo de composiciones (**Vargas E.F. et al.**, 2007). El comportamiento observado en la Figura 2 es similar al descrito por **Rubino, J.T. & Obeng, E.K.** (1991) en el estudio de series homólogas de *p*-hidroxi- y *p*-aminobenzatos de alquilo, en los cuales se encontraron desviaciones negativas a bajas proporciones de PG y desviaciones positivas a altas proporciones del cosolvente.

Como se indicó previamente, una explicación posible para las desviaciones negativas presentadas a bajas proporciones de cosolvente, podría hallarse en el trabajo de **Kimura, F. et al.** (1975), quienes obtuvieron comportamientos similares en los calores de disolución de 1-metil-2-pirrolidinona en mezclas alcohol-agua, y según el cual, a bajas concentraciones de cosolvente, el agua retiene su habilidad para formar estructuras ordenadas.

Como es bien sabido, los cosolventes poseen grupos polares y no polares en su estructura molecular y por lo tanto, se espera que la hidratación hidrofóbica ocurra alrededor de las partes no polares del compuesto, mientras que los enlaces de hidrógeno se forman entre los grupos polares y el agua. Aunque los alcoholes de pequeña masa

Tabla 3. Aplicación del método de Fedors para la estimación de la energía interna, el volumen molar y el parámetro de solubilidad de Hildebrand del NAP.

Grupo o átomo	Cantidad	E / cal mol ⁻¹	V / cm ³ mol ⁻¹
O	1	800	3,8
COOH	1	6600	28,5
CH ₃	2	2 × 1125 = 2250	2 × 33,5 = 67,0
CH	1	820	-1,0
-C=	4	4 × 1030 = 4120	4 × 13,5 = 54,0
Fenilo trisustituido	1	7630	33,4
Total		22220	185,7
$\delta = (22220/185,7)^{1/2} = 10,94 \text{ cal}^{1/2} \text{ cm}^{-3/2}$			

molar generalmente han sido considerados como compuestos polares, **Matsumoto, Y. et al.** (1977) han presentado evidencia de la influencia del grupo metilo terminal de estos cosolventes sobre la estructuración del agua, mediante el estudio de las entalpías molares de exceso. Estas interacciones existentes entre los alcoholes y el agua podrían reducir la interacción entre el agua y los fármacos estudiados, llevando a una solubilidad inferior a la esperada según la ecuación 1.

De otro lado, a altas concentraciones de cosolvente en las mezclas, la estructura tridimensional del agua se pierde y por lo tanto, las moléculas de agua estarían más disponibles para interactuar con las moléculas del fármaco, lo cual a su vez, llevaría a obtener solubilidades más altas que las esperadas según la ecuación 1. De acuerdo con la literatura, otra explicación plausible para esta desviación a la ecuación 1 estaría dada en función de un posible fenómeno de asociación del fármaco en la solución saturada (**Rubino, J.T. & Obeng, E.K.**, 1991), sin embargo para verificar esto en el presente caso se requeriría de otro tipo de evidencia experimental, tal como el estudio de los coeficientes de distribución del NAP en función de la concentración, en diferentes sistemas solvente orgánico/agua.

Rubino J.T. & Yalkowsky, S.H. (1987) indicaron previamente que, en el caso de mezclas binarias cosolvente + agua, las desviaciones obtenidas en altas proporciones de cosolvente correspondían al punto de máxima densidad del solvente. Esta indicación se cumple muy bien en el caso de la solubilidad del NAP en el sistema EtOH + W puesto que la máxima desviación a la ecuación 1 se obtiene en el 60 % m/m de EtOH, y precisamente, en esta composición cosolvente **Jiménez, J. et al.** (2004) obtuvieron el máximo valor del volumen molar de exceso ($-1,082 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$), esto es, la máxima contracción de volumen en el sistema EtOH + W a $25,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta observación también podría soportar el papel desempeñado por la ruptura de la estructura del agua en regiones de composición con alta proporción de cosolvente.

En la literatura se ha presentado evidencia de tipo termodinámico para explicar el comportamiento de este sistema, en términos del cambio de conducción para el proceso de solución del NAP, al pasar de una conducción entrópica por debajo del 30 % m/m de EtOH a una conducción entálpica en concentraciones mayores del cosolvente (**Pacheco, D.P. & Martínez, F.**, 2007). Siendo explicados estos resultados como una consecuencia de la pérdida de estructura del agua presente alrededor de los grupos no polares del fármaco (dos grupos metilo y un naftilo), la cual se encontraba inicialmente asociada entre sí por hidratación hidrofóbica. Esta

desestructuración se va produciendo en la medida en que se reemplaza el agua por etanol.

Una observación adicional a todo lo anterior, es la relacionada con los valores de parámetro de solubilidad de Hildebrand de las mezclas cosolventes en las que se obtienen las máximas desviaciones al modelo logarítmico-lineal (Ecuación 1). Por esta razón en la Figura 3 se presentan estas desviaciones en los sistemas cosolventes EtOH + W y PG + W, en la que puede observarse que la máxima desviación positiva se obtiene alrededor de $17,0 \text{ cal}^{1/2} \text{ cm}^{-3/2}$, mientras que las máximas desviaciones negativas se alcanzan alrededor de $22,0 \text{ cal}^{1/2} \text{ cm}^{-3/2}$ y $20,0 \text{ cal}^{1/2} \text{ cm}^{-3/2}$, para los sistemas EtOH + W y PG + W (**Vargas E.F. et al.**, 2007), respectivamente; siendo mayores las desviaciones obtenidas en el sistema PG + W.

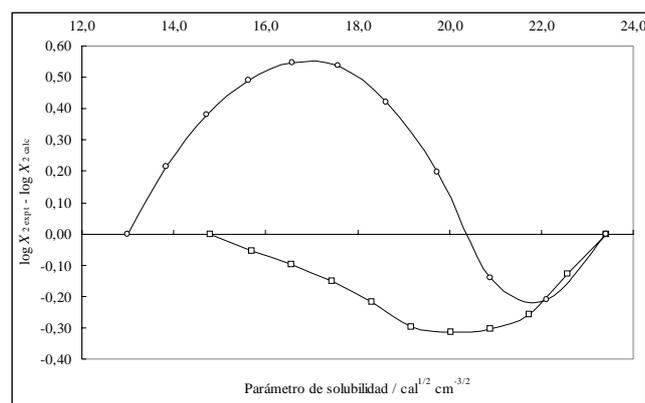


Figura 3. Desviaciones de la solubilidad experimental del NAP respecto a la linealidad en los sistemas EtOH + W (o) y PG + W (□) en función del parámetro de solubilidad de las mezclas cosolventes a $25,0^\circ\text{C}$.

Las razones fisicoquímicas para estos valores no son claras y por lo tanto se requeriría de experimentos adicionales para dar una posible explicación a estos resultados. Como puede analizarse de lo anterior, se tiene que la solubilidad de compuestos orgánicos es un evento fisicoquímico muy complejo que, en adición a los descriptores de polaridad, estaría implicando a otras propiedades de los medios disolventes.

Conclusiones

De todo lo discutido anteriormente se tiene que el NAP presenta desviaciones negativas y positivas al modelo logarítmico-lineal de Yalkowsky & Roseman en el sistema binario EtOH + W; desviaciones que pueden en principio ser atribuidas a efectos de interacción solvente-solvente en las mezclas solventes, así como a las diferencias en la

hidratación hidrofóbica del compuesto. Por lo anterior se hace impráctico el uso del modelo de aditividad de solubilidades para la estimación de esta propiedad fisicoquímica en el caso del NAP en este sistema cosolvente, lo cual conduciría a su vez, a la necesidad de determinar experimentalmente la solubilidad del fármaco en función de la temperatura, en las mezclas solventes que puedan ser útiles durante el proceso de diseño de formulaciones líquidas homogéneas.

Agradecimientos

Muy formalmente agradecemos a la DIB-DINAIN de la Universidad Nacional de Colombia (UNC) por el apoyo financiero y al Departamento de Farmacia de la UNC por facilitar los equipos e instalaciones requeridos para el desarrollo de esta investigación.

Referencias Bibliográficas

- Anton Paar, K.G.** 1980. "DMA 45: Calculating Digital Density Meter Instruction Manual", Graz, Austria. pp. 1-12.
- Belda, R., Herraiz, J.V., Diez, O.** 2004. Rheological study and thermodynamic analysis of the binary system (water/ethanol): Influence of concentration. *Phys. Chem. Liquids* **42**: 467-476.
- Betageri, G.V., Nayernama, A., Habib, M.J.** 1996. Thermodynamics of partitioning of nonsteroidal anti-inflammatory drugs in the *n*-octanol/buffer and liposome systems. *Int. J. Pharm. Adv.* **1**: 310-319.
- Budavari, S., O'Neil, M.J., Smith, A., Heckelman, P.E., Obenchain Jr, J.R., Gallipeau, J.A.R., D'Arecea, M.A.** 2001. "The Merck Index, An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals", 13th edition, Merck & Co., Inc., Whitehouse Station, N.J. p. 1149.
- Bustamante, P., Romero, S., Reillo, A.** 1995. Thermodynamics of paracetamol in amphiprotic and amphiprotic-aprotic solvent mixtures. *Pharm. Sci.* **1**: 505-507.
- Connors, K.A.** 2002. "Thermodynamics of Pharmaceutical Systems: An Introduction for Students of Pharmacy", Wiley-Interscience, Hoboken, N.J. pp. 61-66.
- Fedors, R.F.** 1974. A method for estimating both the solubility parameters and molar volumes of liquids. *Polym. Eng. Sci.* **14**: 147-154.
- Jiménez, F. Martínez, F.** 1995. Una estrategia para la selección sistemática de vehículos en el diseño de formas farmacéuticas líquidas homogéneas. *Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm.* **24**: 19-23.
- Jiménez, J. Manrique, J., Martínez, F.** 2004. Effect of temperature on some volumetric properties for ethanol + water mixtures. *Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm.* **33**: 145-155.
- Jiménez, J.A., Martínez, F.** 2006. Thermodynamic study of the solubility of acetaminophen in propylene glycol + water cosolvent mixtures. *J. Braz. Chem. Soc.* **17**: 125-134.
- Jouyban-Gharamaleki, A., Valaee, L., Barzegar-Jalali, M., Clark, B.J., Acree Jr, W.E.** 1999. Comparison of various cosolvency models for calculating solute solubility in water-cosolvent mixtures. *Int. J. Pharm.* **177**: 93-101.
- Kimura, F., Murakami, S., Fujishiro, R.** 1975. Thermodynamics of aqueous solutions of nonelectrolytes. II. Enthalpies of transfer of 1-methyl-2-pyrrolidinone from water to many aqueous alcohols. *J. Solution Chem.* **4**: 241-247.
- Machatha, S.G., Bustamante, P., Yalkowsky, S.H.** 2004. Deviation from linearity of drug solubility in ethanol/water mixtures. *Int. J. Pharm.* **283**: 83-88.
- Martínez, F., Gómez, A., Ávila, C.M.** 2002. Volúmenes molales parciales de transferencia de algunas sulfonamidas desde el agua hasta la mezcla agua-etanol ($X = 0.5$). *Acta Farm. Bonaerense* **21**: 107-118.
- Martínez, F.** 2005. Utilidad del método extendido de Hildebrand en el estudio de la solubilidad del acetaminofén en mezclas agua-propilenglicol. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **29**: 429-438.
- Matsumoto, Y., Touhara, H., Nakanishi, K., Watanabe, N.** 1977. Molar excess enthalpies for water + ethanediol, + 1,2-propanediol, and + 1,3-propanediol at 298.15 K. *J. Chem. Thermodyn.* **9**: 801-805.
- Millard, J.W., Alvarez-Nuñez, F.A., Yalkowsky, S.H.** 2002. Solubilization by cosolvents: Establishing useful constants for the log-linear model. *Int. J. Pharm.* **245**: 153-166.
- Nokhodchi, A., Shokri, J., Barzegar-Jalali, M., Ghafourian, T.** 2002. Prediction of benzodiazepines solubility using different cosolvency models. *Farmaco* **57**: 555-557.
- Pacheco, D.P.** 2006. "Aspectos Termodinámicos de la Solubilidad del Naproxén en Mezclas Cosolventes", Tesis de Maestría en Ciencias Farmacéuticas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Pacheco, D.P., Martínez, F.** 2007. Thermodynamic analysis of the solubility of naproxen in ethanol + water cosolvent mixtures. *Phys. Chem. Liquids* **45**: 581-595.
- Perlovich, G.L., Kurkov, S.V., Kinchin, A.N., Bauer-Brandl, A.** 2004. Thermodynamics of solutions III: Comparison of the solvation of (+)-naproxen with other NSAIDs. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* **57**: 411-420.
- Resa, J.M., González, C., Goenaga, J.M., Iglesias, M.** 2004. Temperature dependence of excess molar volumes of ethanol + water + ethyl acetate. *J. Solution Chem.* **33**: 169-198.
- Roberts II, L.J. Morrow, J.D.** 2001. Analgesic-antipyretic and antiinflammatory agents and drugs employed in the treatment of gout, en: "Goodman & Gilman's. The Pharmacological Basis of Therapeutics", 10th edition, International Edition, Edited by Hardman, J.G., Limbird, L.E., Gilman, A.G. McGraw-Hill, New York. pp. 703-705.
- Romero, S., Reillo, A., Escalera, B., Bustamante, P.** 1996. The behavior of paracetamol in mixtures of amphiprotic and amphiprotic-aprotic solvents: Relationship of solubility curves to specific and nonspecific interactions. *Chem. Pharm. Bull.* **44**: 1061-1064.
- Rosenstein-Ster, E.** 2004. "Diccionario de Especialidades Farmacéuticas", 32^a edición, Thompson P.L.M., S.A., Bogotá.

- Rubino, J.T., Yalkowsky, S.H.** 1987. Cosolvency and cosolvent polarity. *Pharm. Res.* **4**: 220-230.
- Rubino, J.T.** 1988. Cosolvents and cosolvency, en: "Encyclopedia of Pharmaceutical Technology", Edited by Swarbrick, J., Boylan, J.C. Marcel Dekker, Inc., New York. Vol. 3, pp. 375-398.
- Rubino, J.T., Obeng, E.K.** 1991. Influence of solute structure on deviations from the log-linear solubility equation in propylene glycol: water mixtures. *J. Pharm. Sci.* **80**: 479-483.
- US Pharmacopeia.** 2005. 28th edition, The United States Pharmacopoeial Convention, Rockville, MD.
- Vargas, E.F., Manrique, Y.J., Pacheco, D.P., Torres, N.S., Martínez, F.** 2007. Desviaciones al modelo logarítmico-lineal en la solubilidad de ibuprofén y naproxén en mezclas cosolventes propilenoglicol-agua. *Quím. Nova* **30**: 1945-1950.
- Yalkowsky, S.H., Roseman, T.J.** 1981. Solubilization of drugs by cosolvents, en "Techniques of Solubilization of Drugs", Edited by Yalkowsky, S.H. Marcel Dekker, Inc., New York. pp. 91-134.
- Yalkowsky, S.H.** 1999. "Solubility and Solubilization in Aqueous Media", American Chemical Society and Oxford University Press, New York. pp. 180-235.

Recibido: mayo 4 de 2007.

Aceptado para su publicación: octubre 13 de 2008.

BIOEROSIÓN POR POLIQUETOS ESPIÓNIDOS (POLYCHAETA, SPIONIDAE) EN MOLUSCOS MARINOS DEL CUATERNARIO CARIBEÑO DE COLOMBIA

Por

Rosa Domènech, Jordi Martinell & Jaime de Porta¹

Resumen

Domènech, R., J. Martinell & J. de Porta: Bioerosión por poliquetos espionidos (Polychaeta, Spionidae) en moluscos marinos del Cuaternario caribeño de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 32(124): 411-419, 2008. ISSN 0370-3908.

Caulostrepsis es el icnogénero que designa las perforaciones realizadas por presumibles poliquetos espionidos. Entre otros substratos, es frecuente su presencia tanto en conchas de moluscos actuales como fósiles. En el presente trabajo se estudia este tipo de trazas en especímenes recolectados en sedimentos marinos cuaternarios de Colombia. Este hallazgo representa el primer registro de cualquier tipo de bioerosión en fósiles colombianos.

Palabras clave: paleoecología, parasitismo, icnología, bioerosión, Cuaternario, Colombia.

Abstract

Caulostrepsis is the icnogenus that designates borings made by presumable spionid polychaetes. Among other substrates, its presence is frequent both in shells of Recent and fossil molluscs. In the present paper this type of traces is studied in specimens gathered in marine Quaternary sediments of Colombia. This find represents the first record of any kind of bioerosion in Colombian fossils.

Key words: paleoecology, parasitism, ichnology, bioerosion, Quaternary, Colombia.

¹ Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franquès s/n, 08028, Barcelona; rosa.domenech@ub.edu; jmartinell@ub.edu; j.deporta@telefonica.net

Introducción

Los organismos manifiestan su comportamiento ecológico de formas diversas, siendo una de ellas mediante las marcas o improntas dejadas en el medio que les rodea (físico o biológico). En geología, la alteración del medio debida a la actividad de los organismos llega a comportar tales modificaciones en las características de sedimentos y rocas que su análisis se revela como fundamental en estudios aplicados (Pemberton, 1992; McIlroy, 2004). En paleontología, las trazas preservadas en el registro fósil resultan de primordial importancia en la interpretación paleoecológica y evolutiva ya que a menudo indican la existencia de organismos no preservados de otra forma en el registro fósil. Para diferenciar las marcas (registro indirecto) del registro directo de los organismos, se habla de trazas o pistas fósiles (*trace fossils*) y de fósiles corporales (*body fossils*), respectivamente.

La icnología es la rama de la ciencia que se ocupa del estudio de las trazas producidas por los organismos en el substrato, ya sea éste blando o duro. Si bien es evidente que tales estructuras no son exclusivas del comportamiento de los organismos del pasado, el desarrollo de la icnología se ha producido fundamentalmente en el campo de la paleontología debido a la relevante información que proporcionan acerca de ellos.

Ciñéndonos al tipo de substrato afectado, en icnología se distinguen los procesos de bioturbación de los de bioerosión. La bioturbación se produce en sedimentos blandos, mientras que la bioerosión tiene lugar sobre substrato duro. El presente artículo muestra un ejemplo de bioerosión en el registro fósil, por lo que obviaremos mayor detalle del campo de la bioturbación.

El término bioerosión fue propuesto por Newman (1966) (véase también Ekdale et al., 1984) como una abreviatura de “erosión biológica” y su definición abarca los procesos de desgaste llevados a cabo por organismos sobre substratos consolidados, ya sean de origen orgánico o inorgánico. Los substratos susceptibles de bioerosión cubren un amplio espectro, siendo los de naturaleza calcárea los más afectados. Los organismos bioerosionadores también pertenecen a un amplio abanico de grupos, desde los hongos microscópicos hasta los vertebrados, con representantes en prácticamente todos los grandes taxones vegetales y animales. Muchos de ellos son grupos no esqueletizados, por lo que su presencia como cuerpos fósiles en el registro geológico es escasa o nula.

Las trazas de bioerosión pueden deberse a procesos de coacción (es decir, de interacción entre especies) como

la depredación, el parasitismo y el comensalismo, o bien puede tratarse de procesos de reacción (o sea, de interacción entre una especie y el medio físico), cuando el substrato es inerte. Por todo ello, las trazas toman formas muy diversas (surcos, túneles, impresiones, dentelladas, perforaciones, traumatismos) en función de los objetivos del productor (fijación al substrato, excavación de habitáculos, ramoneo, ataques de depredadores) (Bromley, 1970; Warme, 1975; Martinell, 1989), de su morfología y del procedimiento de excavación.

Los esqueletos calcáreos de los invertebrados marinos se pueden comportar como substratos duros de pequeñas dimensiones en los que la actividad bioerosiva llega a ser muy importante. Además, pueden reflejar tanto comportamientos de coacción como de reacción. Si la bioerosión de la concha se produce en el esqueleto del animal vivo, entonces éste preservará procesos de coacción, mientras que si se produce una vez muerto lo que se preservará son procesos de reacción. Resulta fundamental distinguir ambos casos para evitar interpretaciones erróneas en estudios paleoecológicos.

El gran avance en los estudios sobre bioerosión se produjo a partir de los trabajos de R. Bromley (Bromley, 1970; Bromley, 1972; Bromley & d'Alessandro, 1983). Sin embargo, el reconocimiento de su existencia y de su potencial interés en geología se halla ya en la famosa obra “*Principles of Geology*” (Lyell, 1830). En ella, el autor describe con detalle y precisión las perforaciones realizadas por el bivalvo actual *Lithophaga* en los pilares de las columnas del templo de Júpiter Serapis (Puzzuoli, Italia), que le sirvieron para demostrar movimientos de subsidencia. Es pues en este tratado, reconocido como una de las obras fundamentales de la geología, donde se describen e interpretan por vez primera procesos bioerosivos relacionados con fenómenos geológicos. A pesar de estas interesantes observaciones, los estudios sobre bioerosión se limitaron durante décadas a aspectos muy puntuales, relacionados casi siempre con paleoacantilados de diferentes períodos geológicos.

La nominación de las trazas de bioerosión se basa en su morfología y es independiente de la nomenclatura de sus posibles productores. Los nombres binomiales con que se identifican siguen una normativa equivalente a la de géneros y especies biológicos, hablándose de icnogéneros e icnoespecies.

Un ejemplo de bioerosión en el Cuaternario colombiano

Durante un reconocimiento geológico por el Neógeno y Cuaternario del N de Colombia, uno de los autores (J. de P.) tuvo la oportunidad de recolectar muestras paleon-

tológicas en un yacimiento holoceno cercano a la Ciénaga El Totumo (Departamento de Bolívar).

Entre el material muestreado aparecieron numerosas conchas de moluscos con trazas evidentes de bioerosión, cuyo estudio constituye el motivo principal de este artículo. Si bien en el ámbito de la icnología existe una cita de trazas de bioturbación en el Mesozoico continental de Colombia, referida a icnitas de dinosaurios bípedos (**Buffetaut**, 2000), cabe resaltar que la presente constituye la primera referencia sobre actividad bioerosiva en el registro fósil colombiano.

Características geológicas regionales

Desde un punto de vista estructural, en el NE de Colombia se han distinguido dos grandes áreas o regiones que pertenecen a las provincias sedimentarias continental y oceánica, respectivamente. La provincia continental se localiza al oriente mientras que la provincia oceánica está al occidente (**Duque-Caro**, 1979; 1984). Ambas provincias están separadas por un importante accidente tectónico, la falla de Romeral, conocida también con los nombres de sutura o lineamiento de Romeral (figura 1).

La provincia continental representa una unidad estable cuyos sedimentos descansan sobre la corteza continental. La provincia oceánica corresponde a una unidad inestable que recubre la corteza oceánica y se caracteriza por un importante espesor de sedimentos. En ella se han

diferenciado dos elementos estructurales bien delimitados por las fallas de Romeral y del Sinú: el Cinturón de San Jacinto y el Cinturón del Sinú.

Los dos cinturones son paralelos y tienen una dirección general NE-SW, si bien el Cinturón del Sinú gira en dirección NW en la región de Cartagena-Barranquilla. Ambos cinturones presentan diferencias en litología y edad. El Cinturón de San Jacinto está formado por los anticlinorios de San Jerónimo, San Jacinto y Luruaco. Se trata de anticlinales estrechos y alargados en sentido N-S.

El carácter más significativo del Cinturón del Sinú es la presencia de un volcanismo de lodo. Algunos de estos volcanes son actualmente activos y se emplazan en las proximidades de la Ciénaga El Totumo.

Características del afloramiento

La costa al N de Cartagena de Indias es en general una costa baja en la que se desarrollan algunas ciénagas, solamente interrumpida por pequeños promontorios acantilados como son de S a N: Los Morritos, Punta Canoas, Punta de Piedra y el Faro de Galerazamba.

El afloramiento de la Ciénaga El Totumo se localiza en los alrededores de Galerazamba (Departamento de Bolívar), junto a la antigua vía del algodón que enlaza el Faro de Galerazamba con la Vía del Mar (figura 2), a unos 2 Km de



Figura 1. Contexto geológico del NE de Colombia. La estrella ubica el área de la Ciénaga El Totumo, ampliada en la Figura 2.

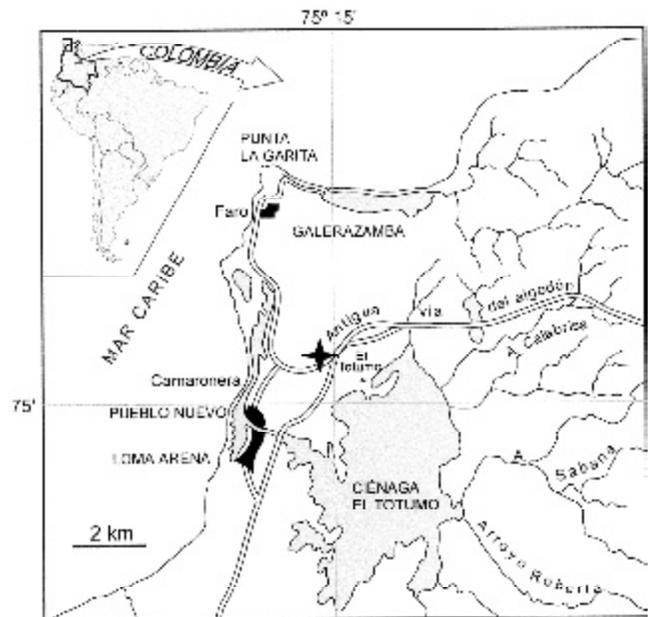


Figura 2. Situación geográfica de la Ciénaga El Totumo, Departamento de Bolívar, Colombia. La estrella señala el afloramiento muestreado.

la actual línea de costa y a 1250 m de la actual Ciénaga El Totumo. El depósito está formado por limos y arcillas holocenos de color claro de 1 m de potencia máxima que fosilizan la Formación Arjona, del Mioceno medio (Barre-ra, 2000). Estos sedimentos están relacionados con el antiguo cauce del río Magdalena y son muy ricos en conchas de moluscos marinos, especialmente bivalvos. La fauna recolectada coincide con la descrita por Cosel (1986) en la Ciénaga de Santa Marta (Departamento del Magdalena), aunque es mucho menos diversificada.

Además de los depósitos holocenos de ciénaga, a lo largo de esta misma costa se conservan otros materiales cuaternarios, como las formaciones arrecifales pleistocenas (Page, 1983; Vernet, 1989a y b), o las numerosas terrazas marinas holocenas situadas a diversas alturas sobre el nivel del mar, cuyas dataciones oscilan entre los 1.450 y los 5.000 años AP.

Material estudiado

Entre el material recolectado se han reconocido las siguientes especies de moluscos: *Anadara ovalis* (Bruguière 1798), *Crassostrea rhizophorae* (Guilding 1828), *Anomalocardia brasiliana* (Gmelin 1971), *Protothaca pectorina* (Lamarck 1818), *Melongena melongena* (Linné 1758) y *Neritina virginea* (Linné 1758). Como fauna acompañante, cabe señalar la presencia esporádica de cirrípedos (balanos) y algunas colonias de briozoos (*Aplousina tuberosa* Canu y Bassler 1928, por ejemplo) (plancha 1, fig. 6). El conjunto se identifica como característico de medios de salinidad reducida y de manglares (Díaz & Puyana, 1994). La datación por radiocarbono sobre la malacofauna indica una edad de 4.150 ± 50 años AP (Porta *et al.*, en prensa).

Sobre las conchas de ciertas especies de moluscos (dos de bivalvos y una de gasterópodos) se observan evidentes trazas de bioerosión, atribuibles en su práctica totalidad a la actividad de anélidos poliquetos perforadores. A continuación se describen las trazas halladas sobre la malacofauna del yacimiento de El Totumo para, seguidamente, comentar la actividad bioerosiva por anélidos y su registro fósil. Por último, se discute algunos aspectos relacionados con la interpretación paleoecológica de dichas perforaciones y con su incidencia en la actualidad.

Análisis de las trazas de bioerosión en los moluscos del yacimiento El Totumo

El estudio icnológico de las conchas de moluscos recolectadas en este yacimiento revela la presencia casi exclusiva de la icnoespecie *Caulostrepsis taeniola* Clarke 1908, traza de bioerosión atribuida a la actividad perfora-

dora de poliquetos espionidos (Polychaeta, Spionidae). En el yacimiento El Totumo, esta estructura es abundante en las conchas de dos especies de bivalvos (*C. rhizophorae* y *A. brasiliana*) y del gasterópodo *M. melongena*. Resalta el hecho de que la relación traza/huésped es única para cada caso, tal como se describe a continuación.

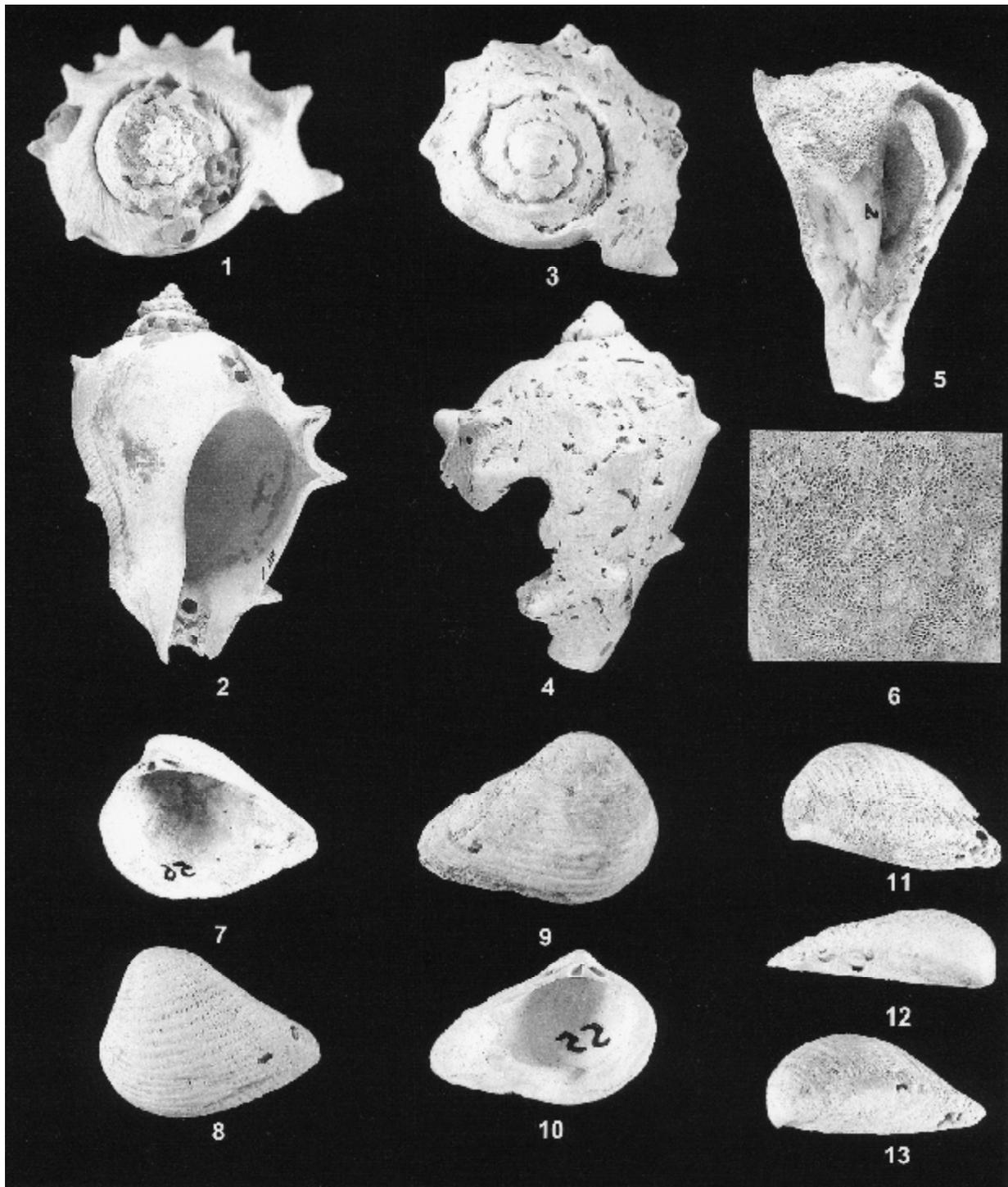
Crassostrea rhizophorae (plancha 2): la ostra de man-gle es una especie eurihalina que típicamente vive adherida a las raíces de estos árboles, formando densos racimos. Los especímenes recolectados son de tamaño medio para la especie (diámetro umbonopaleal medio: 7,2 cm), pero se llega a contabilizar hasta 85 trazas sobre una sola valva, con un promedio de 60 trazas/valva. Las valvas superiores están ligeramente más perforadas que las inferiores ($x=68$ en las valvas superiores y $x=57$ en las inferiores). En el interior de muchas de ellas se observan ampollas rellenas de fango (*mud-blisters*), resultado de la reacción de la ostra ante la infestación (plancha 2, fig. 5).

Anomalocardia brasiliana (plancha 1, figs. 7-13): se trata de un pequeño bivalvo (diámetros umbonopaleal y anteroposterior medios: 1,7 cm y 2,2 cm, respectivamente) endobentónico somero que habita fondos fangosos o arenoso-fangosos en áreas protegidas de la acción de las olas y corrientes de las zonas intermareal e infralitoral (Boehs & Magalhães, 2004). Su presencia es abundante en el yacimiento, pero sólo el 11% de las valvas izquierdas y el 15,5% de las derechas presentan *C. taeniola*. Las perforaciones siempre aparecen en la parte más posterior de las valvas, es decir, la zona más próxima a la superficie del fondo y, seguramente, la más vulnerable a la infestación en vida del animal. Asociada a las perforaciones se ha detectado asimismo alguna ampolla rellena de fango.

Melongena melongena (plancha 1, figs. 1-5): la totalidad de conchas recolectadas de este gasterópodo presentan *C. taeniola*. A lo largo de la espira se observa una concentración de las perforaciones sobre la línea de sutura de las vueltas, mientras que en la última vuelta aparecen trazas esporádicas o en pequeñas concentraciones. No se ha observado en esta especie la presencia de ampollas de fango. La superficie afectada y la intensidad de perforación son mucho menores que en *C. rhizophorae*.

La actividad bioerosionadora de los anélidos poliquetos

Para los neontólogos resulta conocida la actividad perforadora de los anélidos poliquetos, aunque se le haya prestado una atención relativa frente a los estudios anatómicos propiamente dichos. Ello conlleva algunas lagunas



Plancha 1. *Caulostrepsis taeniola* sobre ejemplares de distintas especies de moluscos del yacimiento de la Ciénaga El Totumo. 1-2. Vistas apical y lateral de *Melongena melongena* con balanos incrustados en diferentes partes del esqueleto. 3-4. Vistas apical y lateral de *M. melongena* con profusión de *C. taeniola* ocupando gran parte del esqueleto. 5. *Aplousina tuberosa* incrustando una gran superficie de un esqueleto de *M. melongena*. La colonización tuvo lugar con posterioridad a la muerte del gasterópodo y a la fracturación del esqueleto. 6. Detalle de la colonia anterior. 7-10. Valvas derecha e izquierda de *Anomalocardia brasiliana* en vistas externa e interna mostrando *C. taeniola* limitados a su parte posterior. 11-13. Vistas posteriores de ambas valvas de *A. brasiliana* con *C. taeniola*. Escala: figs. 1-5: x1; fig. 6: x 3; figs. 7-13: x 2.



Plancha 2. *Caulostrepsis taeniola* sobre distintos ejemplares de *Crassostrea rhizophorae* del yacimiento de la Ciénaga El Totumo. La fig. 2 corresponde a la ampliación del marco dibujado en la fig. 1. y en la fig. 5 se aprecian las ampollas de fango (*mud-blisters*) consecuencia de la actividad de los poliquetos. Escala x 1, excepto fig. 2 (x 2) y fig. 7 (x 1,5).

en la interpretación de la relación establecida entre perforador y huésped. Consúltense, sin embargo, **Martin & Britayev** (1998) para una visión de todo el grupo, y **Sako-Osoki** (1999) para un ejemplo concreto de poliquetos actuales perforadores.

Se han descrito diversos icnotaxones relacionados con la bioerosión causada por gusanos en general, siendo *Maeandropolydora* Voigt 1965, *Caulostrepsis* Clarke 1908, *Trypanites* Mägdefrau 1932 y *Talpina* von Hagenov 1840 los icnogéneros más comunes en el registro fósil (**Bromley**, 1972; **Voigt**, 1975; **Bromley & d'Alessandro**, 1983; **Bromley**, 2004). Tanto *Maeandropolydora* (del que se ha propuesto un mínimo de 6 icnoespecies distintas) como *Caulostrepsis* (con otras 6 icnoespecies nominadas) se suelen asociar más concretamente a anélidos poliquetos espionidos.

Las trazas atribuidas a posibles anélidos se remontan al Cámbrico (*Trypanites*), aunque su registro fósil no empieza a ser abundante hasta mediado el Paleozoico. *Caulostrepsis*, la traza presente en las conchas estudiadas, es conocida desde el Devónico hasta la actualidad, siendo abundante en el Jurásico y el Cretácico (**Bromley**, 2004).

Estas excavaciones se identifican tanto sobre substratos inorgánicos (sobre los que es evidente que realizan trazas de habitación) como orgánicos. En este segundo caso, se debe distinguir si la bioerosión se realizó en vida del organismo o una vez muerto, para interpretar el objetivo del ataque. Aún así, se dan casos curiosos como los de *Helicotaphrichnus* (**Kern et al.**, 1974) o *Polydorichnus* (**Ishikawa & Kase**, 2007), producidos por poliquetos comensales de cangrejos ermitaños en las conchas de gasterópodos ocupadas por éstos.

Cuando la infestación se produce en el esqueleto calcáreo de un organismo vivo, el anélido suele excavar un surco o un túnel, y puede provocar la secreción de estructuras de defensa por parte del huésped, tales como bioclaustraciones (**Palmer & Wilson**, 1988; **Taylor**, 1990; **Tapanila**, 2005) o ampollas que pueden llenarse de fango (*mud-blisters*) (**Martin & Britayev**, 1998).

Como la gran mayoría de bioerosionadores, los anélidos perforadores suelen carecer de un esqueleto fosilizable. Por tanto, sólo la identificación de las trazas permite determinar su presencia en el pasado geológico. Sin embargo, en el registro fósil no resulta fácil discernir entre las perforaciones realizadas realmente por poliquetos de aquéllas debidas a la actividad de otros gusanos (sipuncúlidos, forónidos, nemátodos, etc.) a causa de las similitudes morfológicas de las mismas. **Taylor & Wilson** (2003) revisan el registro fósil de las comunidades de substrato duro y proporcionan ejem-

plos de distintos tipos de explotación y simbiosis, incluyendo casos de anélidos sobre diferentes substratos.

Discusión y comentarios

El registro fósil de invertebrados marinos contiene numerosos ejemplos de relaciones interespecíficas, **reflejadas a menudo por trazas de bioerosión** (**Martinell**, 1989; **Taylor & Wilson**, 2003). Muchos de ellos corresponden a casos de explotación ecológica (depredación y parasitismo), en los cuales uno de los miembros del par obtiene un beneficio a expensas del otro. Cuando el individuo perjudicado posee un esqueleto fosilizable, entonces puede exhibir en él las marcas de la lesión que permiten identificar la relación. Otros tipos de interacciones bióticas, como la simbiosis (mutualismo, tolerancia, comensalismo) o la competición, dejan menos huellas en el huésped y por tanto suelen resultar más difíciles de detectar en los fósiles.

Los anélidos poliquetos infestan actualmente el esqueleto de huéspedes pertenecientes a grupos muy diversos, entre los que destacan los corales, los atrioquios, los moluscos y los equinodermos (**Martin & Britayev**, 1998). Igualmente, muchos grupos actuales ocupan las partes blandas de sus huéspedes, pero estos casos no son detectables en el registro fósil. La relación que se establece en estos pares ecológicos es básicamente de parasitismo o de comensalismo. El ejemplo que nos ocupa puede ser interpretado como un caso de parasitismo, a la luz de los estudios actualistas sobre este tipo de relaciones.

Maeandropolydora y *Caulostrepsis* designan túneles meandriformes excavados sobre roca o sobre conchas cuyas principales diferencias radican en la proximidad (*Caulostrepsis*) o separación (*Maeandropolydora*) entre los orificios de entrada y salida, la existencia o no de bolsones en su interior, y en el recorrido de los túneles (**Bromley & D'Alessandro**, 1983). Ambos casos se suelen interpretar como de parasitismo si la infestación se produjo sobre concha viva y los productores se describen como endoesqueletozoos (según la terminología de **Taylor & Wilson**, 2002). *Sulcichnus* (**Martinell & Domènech**, en prensa), en cambio, es una traza conocida desde el Mioceno, producida por poliquetos comensales (*Lumbrineris flabellicola* actual, por ejemplo) que viven asociados a corales ahermatípicos sobre los que excavan un surco, de manera que se interpreta el productor como un epiesqueletozoo (según la terminología de **Taylor & Wilson**, 2002).

En el ejemplo estudiado de las perforaciones en moluscos holocenos del yacimiento El Totumo se atribuye

al comportamiento parasitario de la familia Spionidae. Ello se debe a la similitud entre las trazas producidas por distintos géneros del grupo de *Polydora* sobre conchas actuales y la icnoespecie identificada (*C. taeniola*). Los espionidos (*Polydora*, *Boccardia*, *Dipolydora*) son poliquetos bien conocidos por sus infestaciones en bivalvos de valor comercial (ostras sobre todo), aunque algunos géneros del grupo perforan también otros substratos orgánicos (costas algales calcáreas, corales, briozoos, etc.).

Finalmente, un comentario sobre el interés de los estudios de bioerosión en el campo de la economía. El cultivo de ostras (*C. rhizophorae*, por ejemplo) y de otros moluscos (*A. brasiliana* también se cultiva y explota para consumo humano) es hoy en día una importante industria alimentaria que a menudo se ve afectada por plagas de parásitos (sobre todo, poliquetos espionidos) que infestan y dañan las conchas, reduciendo su valor comercial (Martín & Britayev, 1998). El material procedente del yacimiento El Totumo permite observar la actividad de estos poliquetos perforadores en ambientes similares al de las zonas de cultivo actuales, pero sin la influencia humana. Si bien existen numerosos artículos sobre la incidencia de poliquetos parásitos en los cultivos de moluscos y su tratamiento (Murad, 1976; Wargo & Ford, 1993; Nel *et al.*, 1996; Handley, 2002), aún no es bien conocida la influencia de factores como la contaminación de las aguas o los cambios de temperatura en la proliferación de este tipo de simbioses. Los datos del registro fósil pueden aportar patrones de referencia para evaluar el impacto de los poliquetos en poblaciones actuales de moluscos y actuar en consecuencia, además de contribuir a estudios de paleobiología conservacional y evolución temporal de las relaciones simbióticas (Rodrigues, 2007).

Conclusiones

Se ha descrito la presencia de *Caulostrepsis taeniola*, traza de bioerosión atribuida a la actividad de poliquetos espionidos, en las conchas de tres especies de moluscos (*Crassostrea rhizophorae*, *Anomalocardia brasiliana* y *Melongena melongena*) recolectadas en el yacimiento holoceno El Totumo (4.150 ± 50 años AP).

La infestación se interpreta como un caso de parasitismo entre posibles espionidos y estas especies, si bien la distribución de las trazas es distinta en cada una de ellas. En los ejemplares de bivalvos se han identificado estructuras tipo *mud-blister*, más frecuentes en *C. rhizophorae* que en *A. brasiliana*. En cambio, las conchas de *M. melongena* no las presentan en ningún caso.

La presente constituye la primera referencia sobre actividad bioerosiva en el registro fósil colombiano. Cabe esperar que este tipo de estudios prosigan, tanto sobre materiales cuaternarios como en otros más antiguos, puesto que pueden proporcionar interesante información de cariz tanto paleobiológico como estratigráfico y sedimentológico.

Se ha puesto de relieve el interés de este tipo de estudios para la mejora en la gestión del cultivo de moluscos en relación con las infestaciones por parásitos que alteran las características morfológicas de las conchas.

Agradecimientos

J. de Porta expresa su agradecimiento a Ingeominas (Sección de Bogotá y Sección de Cartagena) por la oportunidad que le brindó de visitar y muestrear el yacimiento de la Ciénaga de El Totumo así como por el apoyo logístico recibido.

Esta es una contribución al proyecto de investigación CGL2007-60507/BTE (Ministerio de Educación y Ciencia español) y se enmarca en las actividades del Grupo de Investigación "Paleobiología del Neogen Mediterráneo" de la Universitat de Barcelona.

Bibliografía

- Barrera, R., 2001. Geología de las Planchas 16-17 (Galerazamba y Barranquilla). Esc. 1:100.000. Ingeominas. Memoria explicativa.
- Boehs, G. & Magalhães, A.R.M. 2004. Simbioses asociados con *Anomalocardia brasiliana* (Gmelin) (Mollusca, Bivalvia, Veneridae) na Ilha de Santa Catarina e região continental adjacente, Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, **21**: 865-869.
- Bromley, R. G. 1970. Borings as trace fossils and *Entobia cretacea* Portlock, as an example. In: Trace fossils, T.P. Crimes & J.C. Harper (Eds.). *Geological Journal Special Issues*, **3**: 49-90.
- Bromley, R.G. 1972. On some ichnotaxa in hard substrates, with a redefinition of *Trypanites* Mägenfrau. *Paläontologische Zeitschrift*, **46**: 93-98.
- Bromley, R.G. 2004. A stratigraphy of marine bioerosion. In: The application of Ichnology to Palaeoenvironmental and Stratigraphic Analysis, D. McIlroy (Ed.), Geological Society Special Publication, **228**: 455-479.
- Bromley, R.G. & D'Alessandro, A. 1983. Bioerosion in the Pleistocene of southern Italy: ichnogenera *Caulostrepsis* and *Maeandropolydora*. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, **89**: 283-309.
- Buffetaut, E., 2000. A forgotten episode in the history of dinosaur ichnology: Carl Degenhardt's report on the first discovery of fossil footprints in South America (Colombia, 1839). *Bulletin de la Société Géologique de France*, **171**: 137-140.

- Cosel, R. von.** 1986. Moluscos de la región de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Costa Caribe de Colombia). *Anales del Instituto de Investigaciones Marinas de Punta Betín*, **15-16**: 79-370.
- Díaz, J. M. & Puyana, M.** 1994. Moluscos del Caribe colombiano. Un Catálogo Ilustrado. Colciencias. Fundación Natura, Invemar: 1-291.
- Duque-Caro, H.** 1979. Major structural elements and evolution of Northeast Colombia. In: J.S. Watkins, J.L. Montader, P.W. (Eds.). *Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins*. American Association of Petroleum Geology. *Mem.* **29**: 329-351.
- Duque-Caro, H.** 1984. Structural style, diapirism and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto Terrane, southwestern Caribbean borderland. *Geological Society of America. Mem.* **162**: 303-316.
- Ekdale, A.A.; Bromley, R.G. & Pemberton, S.G.** 1984. Ichnology: The use of trace fossils in Sedimentology and Stratigraphy. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Short Courses*, **15**: 1-317.
- Handley, S.J.** 2002. Optimizing intertidal Pacific oyster (*Crassostrea gigas* Thunberg) culture, Houhora Harbour, northern New Zealand. *Aquaculture Research*, **33**: 1019-1030.
- Ishikawa, M. & Kase, T.** 2007. Spionid bore hole *Polydorichnus subapicalis* new ichnogenus and ichnospecies: a new behavioral trace in gastropod shells. *Journal of Paleontology*, **81**: 1466-1475.
- Kern, J.P.; Grimmer, J.C. & Lister, K.H.** 1974. A new fossil spionid tube, Pliocene and Pleistocene of California and Baja California. *Journal of Paleontology*, **48**: 978-982.
- Lyell, C.** 1830. *Principles of Geology, being an attempt to explain the former changes of the earth's surface, by reference to causes now in operation*. 2 vols., Murray, 1-841.
- Martin, D. & Britayev, T.A.** 1998. Symbiotic Polychaetes: Review of known species. In: A.D. Ansell, R.N. Gibson, M. Barnes (Eds.). *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*. **36**: 217-340.
- Martinell, J.** 1989. Interacción organismos/sustrato duro: la bioerosión y sus implicaciones. In: E. Aguirre (Coord.), *Paleontología, Col. Nuevas Tendencias*: 205-222, CSIC, Madrid.
- Martinell, J. & Domènech, R.** Commensalism in the fossil record: eunicid polychaete bioerosion on Pliocene solitary corals of the Western Mediterranean. *Acta Palaeontologica Polonica* (en prensa).
- McIlroy, D.** (ed.) 2004. The application of ichnology to palaeoenvironmental and stratigraphic analysis. *Geological Society of London, Special Publication*, **228**: 1-490.
- Murad-B. M., M.** 1976. Relationship between biofouling and growth of the pearl oyster *pinctada fucata* (Gould) in Kuwait, Arabian Gulf. *Hydrobiologia*, **15**: 129-138.
- Nel, R.; Coetzee, P.S. & Van Niekerk, G.** 1996. The evaluation of two treatments to reduce mud worm *Polydora hoplura* (Claparède) infestations in commercially reared oysters (*Crassostrea gigas* Thunberg). *Aquaculture*, **141**: 31-39.
- Neumann, C.** 1966. Observations on coastal erosion in Bermuda and measurements of the boring rate of the sponge *Cliona lampa*. *Limnology and Oceanography*, **11**: 92-108.
- Page, W.D.** 1983. Holocene deformation of the Caribbean coast, northwestern Colombia. Part III. Appendix A1-A20. In: H. Duque-Caro, W.D. Page, J. Cuellar (Leaders). *General geology and tectonics of Northwestern Colombia Southeastern Caribbean boreland*. 10ª Conferencia Geológica del Caribe. Fiel Trip C. Cartagena.
- Pemberton, S.G.** (ed.) 1992. Applications of ichnology to petroleum exploration – A core workshop. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Core Workshop* **17**: 1-429.
- Palmer, T. & Wilson, M.A.** 1988. Parasitism of Ordovician bryozoans and the origin of pseudoborings. *Palaeontology*, **31**: 939-949.
- Porta, J. de, Julià, R. & Barrera, R.** Raised marsh deposits near Catagena de Indias, Colombia: evidence of eustatic and climatic instability during the Late Holocene. *Boletín de Geología* (en prensa).
- Rodrigues, S.** 2007. Biotic interactions recorded in shells of Recent Rhynchonelliform brachiopods from San Juan Island, USA. *Journal of Shellfish Research*, **26**: 241-252.
- Sato-Osoki, W.** 1999. Polydorid species (Polychaeta: Spionidae) in Japan, with descriptions of morphology, ecology and burrow structure. 1. Boring species. *Journal of Marine Biology Association United Kingdom*, **79**: 831-848.
- Tapanila, L.** 2005. Palaeoecology and diversity of endosymbionts in Palaeozoic marine invertebrates: Trace fossil evidence. *Lethaia*, **38**: 89-99.
- Taylor, P.D.** 1990. Preservation of soft-bodied and other organisms by bioimmuration- a review. *Palaeontology*, **33**: 1-17.
- Taylor, P.D. & Wilson, M.A.** 2002. A new terminology for marine organisms inhabiting hard substrates. *Palaios*, **17**: 522-525.
- Taylor, P.D. & Wilson, M.A.** 2003. Palaeoecology and evolution of marine hard substrate communities. *Earth-Science Reviews*, **62**: 1-103.
- Vernette, G.** 1989a. Les variations du niveau marin. Exemple de la cote colombienne des Caraïbes a l'Holocène. *Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine*, **45**: 81-95.
- Vernette, G.** 1989b. Impact du diapirisme argileux sur les récifs de la plate-forme colombienne des Caraïbes. *Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine*, **45**: 97-105.
- Voigt, E.** 1975. Tunnelbaue rezenter und fossiler Phoronidea. *Paläontologische Zeitschrift*. **49**: 135-167.
- Wargo, R.N. & Ford, S.E.** 1993. The Effect of Shell Infestation by *Polydora* sp. and Infection by *Haplosporidium nelsoni* (MSX) on the Tissue Condition of Oysters, *Crassostrea virginica*. *Estuaries*, **16**: 229-234.
- Warme, J.E.** 1975. Borings as trace fossils, and the process of marine bioerosion. In: *The study of trace fossils*, Frew R.W. ed., Springer Verlag, Berlin: 181-227.

Recibido: marzo 3 de 2008.

Aceptado para su publicación: octubre 3 de 2008.

DIVERSIDAD Y BIOGEOGRAFÍA PRELIMINAR DE LAS MARIPOSAS SALTARINAS (LEPIDOPTERA: HESPERIIDAE) DE COLOMBIA

Por

Luis Antonio González Montaña¹ & M. Gonzalo Andrade-C.²

Resumen

González Montaña, L.A., & M.G. Andrade-C.: Diversidad y biogeografía preliminar de las mariposas saltarinas (Lepidoptera: HesperIIDae) de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(124): 421-433, 2008. ISSN 0370-3908.

Se obtuvieron datos para 231 especies en 119 géneros, depositados en la colección de entomología del Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, distribuidos principalmente en la región Andina en cuatro subfamilias: Pyrrhopygini (13 géneros, 27 especies), "Pyrginae" (53 géneros, 114 especies), Heteropterinae (1 género, 11 especies) y Hesperinae (52 géneros y 79 especies). La biogeografía del grupo no puede explicarse por medio de la vicarianza o adoptar otras hipótesis biogeográficas, debido a la distribución simpátrica, lo cual implica la falta de relación entre especiación y alopatría. La hipótesis de "taxon pulses" puede explicar parcialmente la biogeografía del grupo.

Palabras clave: simpatría, hipótesis "taxon pulses", biodiversidad, Hesperinae, Pyrrhopygini, "Pyrginae", Andes del Norte, Colombia.

Abstract

We collected data for 231 species in 119 genera, deposited in the collection of entomology at the Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, distributed mainly in the Andean region in four subfamilies: Pyrrhopygini (13 genera, 27 species), "Pyrginae" (53 genera, 114 species), Heteropterinae (1 genus, 11 species) and Hesperinae (52 genera and 79 species). The biogeography of the group cannot be explained by the vicariance or take other biogeographic hypothesis, because of the sympatric distribution, which implies the lack of relationship between

¹ Programa Mariposas de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Carrera 30 No. 45-03, Edificio 425. Oficina 207. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: antoniohosp@gmail.com

² Profesor Asociado, Programa Mariposas de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Carrera 30 No. 45-03, Edificio 425, oficina 207, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: mgandradec@unal.edu.co

speciation and allopatric. The hypothesis of taxon pulses may partially explain the biogeography of the group.

Key words: sympatric, hypothesis taxon pulses, biodiversity, hesperiinae, pyrrhopygini, “Pyrginae”, Northern Andes, Colombia.

Introducción

La familia HesperIIDae es reconocida por la terminación de la antena en forma de gancho, la presencia de un par de espinas en el extremo apical de las tibias del segundo par de patas, hileras de espinas de tamaño pequeño sobre las tibias y una amplia distancia entre las antenas. **Andrade-C., et al.**, 2007. Tradicionalmente se consideraban siete subfamilias Coeliadinae, Pyrrhopyginae, Pyrginae, Heteropterinae, Trapezitinae, Megathyminae y Hesperinae; sin embargo, **Warren et al.**, (2008) al realizar una filogenia para la familia ha cambiado el estatus actual para algunos taxones en HesperIIDae, estableciendo a Pyrrhopyginae como una tribu más de Pyrginae, esta subfamilia, la cual no es monofilética “Pyrginae” y Megathyminae como una infratribu de Hesperinae.

En Colombia se registran tres subfamilias, “Pyrginae”, Heteropterinae y Hesperinae, las cuales tienen amplia distribución en el mundo, distinguibles por la forma de alas y la disposición de las mismas en reposo, variaciones en el número de segmentos del nudum o maza antenal y forma en la terminación del apiculus o extremo apical de las antenas, presencia de caracteres sexuales secundarios en los machos, los cuales se presentan sobre las alas anteriores como sucede para gran parte de las especies de Hesperinae o en forma de penachos en las bases de las patas posteriores en las especies que integran los “Pyrginae”.

Andrade-C. et al. (2007) y **Lamas** (2000) otorgan un tercer puesto para Colombia, después de Brasil y Perú, en la riqueza de especies para HesperIIDae, una de las familias más numerosas, pero a la vez, la menos estudiada, debido en gran parte a su taxonomía compleja, convergencia notable en patrones de coloración entre taxones no relacionados, falta de caracteres diagnósticos y escasez de ejemplares depositados en colecciones.

La historia de la hesperología en Colombia se remonta a los trabajos de **Godman & Salvin** (1901) y **Draudt** (1924), donde se realizaron descripciones e ilustraciones de una parte importante de la fauna de HesperIIDae colombiana. En la década de los cincuenta William Harry Evans publica sus trabajos sobre los HesperIIDae Americanos depositados en el Museo Británico de Historia Natural, un excelente trabajo, donde se destaca la inclusión de ilustraciones sobre las genitales de los machos, importantes para la

identificación de especies. Los trabajos que abordan directamente la fauna de hespéridos en Colombia son escasos, destacándose entre ellos los catálogos realizados por **Gallego** (1946), **Hayward** (1947) y **Andrade-C.** (2002), este último presenta una regionalización de la fauna de mariposas del país, aportando datos para 120 especies de HesperIIDae, y los trabajos de **Salazar & Vargas** (2002) y **Vargas & Salazar** (2006) quienes hacen referencia a especies de hespéridos poco observados en Colombia.

En este estudio se presenta un análisis preliminar sobre la biogeografía de HesperIIDae para el país, con especial referencia al material depositado en la Colección de Entomología del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia e información recopilada de la literatura. Igualmente se describe brevemente un caso de estudio para los Andes colombianos, donde se presentan los problemas relacionados con interpretaciones sobre la biogeografía del grupo.

Materiales y métodos

Se identificó el material depositado en la colección de entomología del Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, principalmente por medio de los trabajos de **Godman & Salvin** (1901), **Draudt** (1924), **Evans** (1951, 1952, 1953, 1955) y actualización de su nomenclatura a partir de **Mielke** (2004, 2005) y a nivel supragénico **Warren et al.**, (2008). De manera complementaria, se hizo una revisión de literatura con registros para Colombia, además de registros para regiones dentro y fuera del país como **Lamas & Grados** (1996), **Godman & Salvin** (1901), **Steinhauser** (1986; 1989, 1991), **Burns** (1989; 1992), **McNiell & Herrera** (1998), **Bell** (1941), **Salazar & Vargas** (2002), **Vargas & Salazar** (2005), **Viloria et al.** (2008), **Nicolay** (1973), **Mielke** (1989, 1994), **Llorente-Bousquets et al.** (1990), **Warren** (2000), **Monroe & Miller** (1967) y **Pulido & Andrade-C.** (2007) con el fin de hacer una aproximación a la distribución de las especies registradas. Las localidades de colección fueron tomadas directamente del material revisado e información de la literatura.

En aquellos casos donde no fue posible distinguir especies, se realizaron disecciones de genitales de machos y hembras, lo cual consiste en la separación del abdomen e

inclusión del mismo en una solución de KOH al 10% durante 48 horas y su posterior disección (Clarke, 1941).

Resultados y Discusión

Riqueza

Se recopiló información para 118 géneros y 231 especies distribuidos en Pyrrhopygini con 13 géneros y 27 especies, “Pyrginae” con 53 géneros y 114 especies, Heteropterinae con un género y once especies y Hesperinae con 52 géneros y 79 especies (véase Apéndice I), cifras que constituyen cerca del 30.5% del estimativo de Andrade-C. (2002) y 23.7% de los valores de Lamas (2000) para las especies registradas en Colombia (Tabla 1).

Gran parte de los registros en el país pertenecen a la Región Andina, lo cual coincide con los datos de Andrade-C. (2002), particularmente, en el flanco oriental de la Cordillera Occidental y en el flanco oriental de la Cordillera Oriental. Esto se atribuye a los mayores trabajos de inventario para estas regiones, y cercanía con las principales colecciones biológicas en el país (Figura 1).

Para otras regiones importantes como la vertiente pacífica y en la Amazonía colombiana, Hesperidae es poco conocida, a pesar de su amplia diversidad biológica. Para los datos de localidades de colecta el número de especies es bajo, entre otras causas por la misma rareza ecológica y baja densidad de individuos que caracteriza a la familia en general (Lamas, 1994).

Teniendo en cuenta que los datos registrados por Lamas (2000) y Andrade-C. (2002) son estimativos, se decidió utilizar la información suministrada por Mielke(2004), con localidades tipo (Tabla 1) como un índice de esta riqueza para el país, aunque es claro que no es una medida

exacta, si permite realizar comparaciones con otras regiones. De esta manera Colombia se ubica en cuanto a la riqueza de la familia Hesperidae en un quinto puesto después de Brasil, Guatemala, México y Perú; estos datos son un indicio de las regiones en que mejor se ha explorado la fauna de hespéridos en el Neotrópico, sin olvidar el sentido histórico implícito de lo que ha sido la exploración de la familia en Colombia.

Muy seguramente los registros de Hesperidae en el país pueden aumentar considerablemente, muy por encima de los estimativos conocidos, en particular en aquellos grupos con especies crípticas y en aquellas regiones con bajas densidades de localidades de colecta, como el Pacífico o la Amazonía colombiana. Su diversidad real sólo puede ser conocida al aumentar los trabajos de colección del grupo, sobre todo en aquellas regiones donde existen vacíos de información.

Biogeografía

Como zona de transición, Colombia incluye faunas con orígenes en Norte y Sur América, un proceso que ha explicado en forma notoria la distribución de una amplia variedad de organismos (Callaghan, 1983; Brown, 1987; Latkke, 2005; Kimsey, 1992) y la colonización de especies. Los rangos amplios de distribución y solapamiento son constantes para la gran mayoría de especies conocidas, lo que sugiere a primera vista la ocurrencia de procesos de simpatria como un hecho explicativo de la biogeografía del grupo.

Aunque la formación de barreras y alopatría puede explicar gran parte de los procesos de especiación y distribución de muchos organismos, plantas o animales, resultando en la única hipótesis a probar, en este caso no es posible hacerlo, debido a que en este

Tabla 1

Subfamilia	México ^{1,4}	Honduras ³	Guatemala ²	Colombia ^{1,5}	Venezuela ¹	Ecuador ¹	Perú ¹	Brasil ¹	Argentina ¹
Pyrrhopygini	13 (29)	1	15	31 (78)	10	17	40	58	4
“Pyrginae”	136 (354)	54	219	124 (311)	72	70	137	318	50
Heteropterinae	24	?	3	27 (24)	11	29	28	11	5
Hesperinae	142 (353)	29	143	91 (153)	91	94	104	367	64
Total	315(736)	84	380	180 ^a ; 273 ^b ; 750 ^c ; 566 ^d ; 965 ^e	184	210	309(1122 ^e)	754	123

Fuentes: (1) Mielke (2004); (2) Austin et al. (1998); (3) Monroe & Miller (1967); (4) Llorente-Bousquets et al. (1990); (5) Hayward, (1947) (a) en este estudio; (b) Mielke (2004); (c) estimativo para Colombia (Andrade-C. 2002); (d) catálogo publicado por Hayward (1947); (e) Lamas (2000).

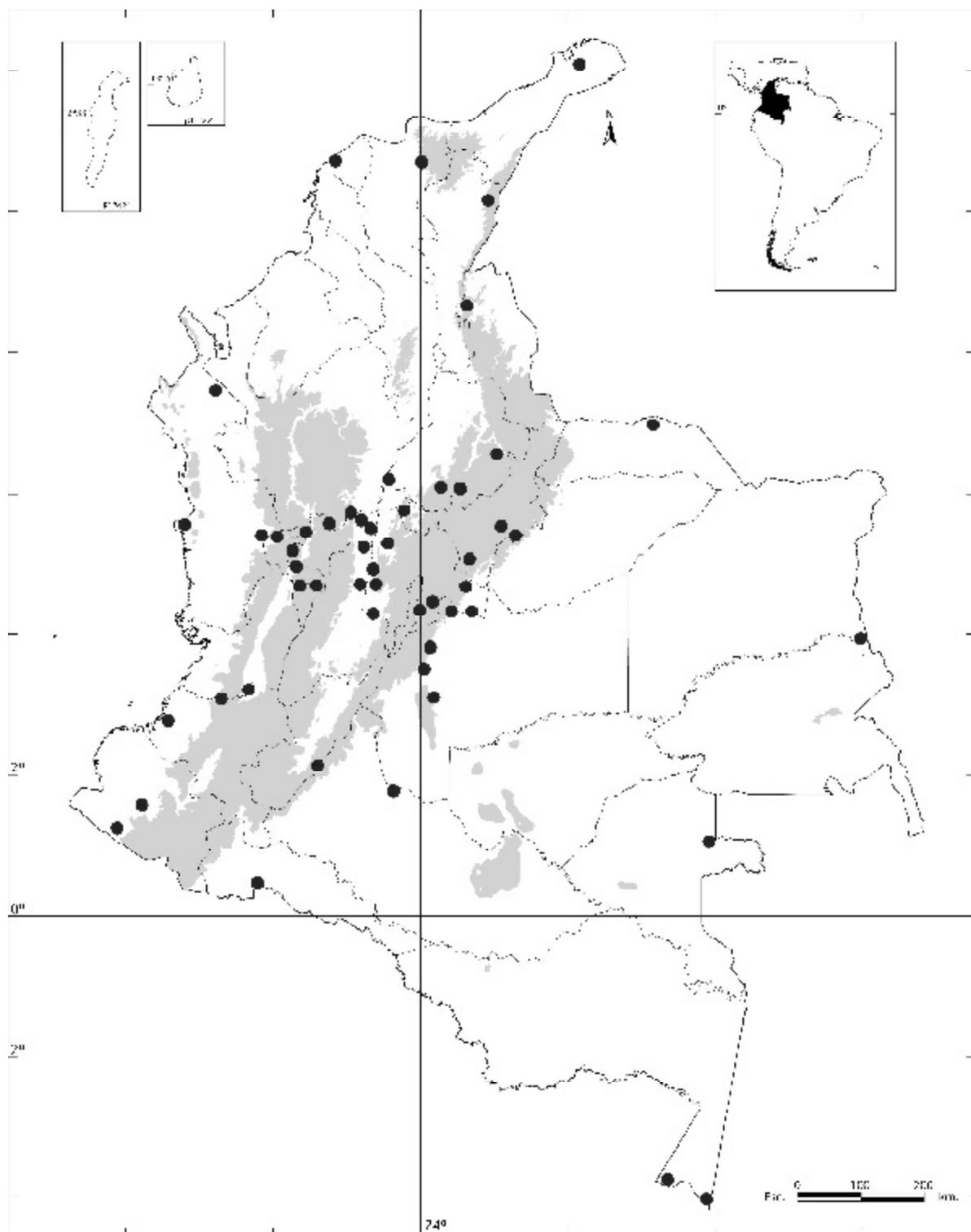


Figura 1. Localidades de distribución para Hesperidae, conocidas a partir del material revisado en la colección del Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.

momento no se pueden relacionar eventos de especiación y formación de barreras biogeográficas o edad de establecimiento de un taxón en su área de distribución actual, que en último caso, sólo puede ser explicativo a una escala continental (Figura 4).

Un escenario alternativo puede ayudar a explicar la distribución observada. Erwin (1981) propone la hipótesis “taxon pulses” para explicar la biogeografía y diversificación biótica dentro de la familia de escarabajos, Carabidae (Coleoptera). Esta hipótesis es una modificación de la idea de Wilson (1961) sobre ciclos de taxones “taxon cycles”, amplitud y reducción de especies en sistemas insulares, por lo que la relación especie-área tiene importancia en explicar dicho modelo. La hipótesis de “taxón pulses” fue posteriormente discutida y comparada con la diversificación por vicarianza por Halas *et al.* (2005) y Brooks (2005), quien hace una propuesta metodológica para discernir esta y eventos de cladogénesis por vicarianza y diversificación biótica; consta de las siguientes apreciaciones principales:

1. No hay relación entre especiación con la formación o levantamiento de barreras geográficas, vicarianza.
2. La diversificación está dada por la expansión biótica; se encuentran patrones asociados con la dispersión.
3. Expansiones bióticas en áreas grandes involucran relaciones históricas reticuladas.
4. La ausencia de un clado en un área está dada por la falta de eventos de extinción más que dispersión con extinción.

Se presentan dos ejemplos para interpretar la hipótesis sobre diversificación biótica. El primer ejemplo hace referencia al complejo de especies, establecido aquí como grupo “*coryna*” y que incluye a *Vettius coryna* (Hewitson, 1866) y *Vettius argentus* Freeman, 1969. Dentro de *V. coryna* se distinguen tres formas, las cuales varían en el número de manchas de las alas anteriores –tres en total– y en la estructura general de los genitales de los machos. Una primera forma se presenta sobre la Cordillera Occidental, Macizo Colombiano y parte de Ecuador. La segunda para la Cordillera Oriental desde Cundinamarca hasta la Serranía del Perijá con *V. coryna catargyra* (Felder, 1867) y una tercera que se distribuye en parte sobre las cordilleras Oriental y Central. Estas formas tienen distribuciones que se solapan parcialmente. *V. argentus* Freeman, 1969 se reporta para México y probablemente Guatemala. Con excepción de *V. argentus* el grupo “*coryna*” se distribuye sobre las vertientes y partes altas del sistema montañoso de los Andes hasta Bolivia. En Colombia estas formas se presentan en bordes de bosques poco perturbados.

El cladograma hipotético de la figura 2 muestra las relaciones posibles dentro del grupo “*coryna*”. Como se observa, eventos aparentes de vicarianza no son evidentes e igualmente la dispersión ha jugado un papel importante. ¿Cómo se produjo la distribución actual en “*coryna*”? un escenario es la distribución del stock ancestral de “*coryna*” establecido con el levantamiento de los Andes, con posterior especiación por vicarianza debido a las cordilleras en Colombia y subsiguiente dispersión, incluso hacia Centro América con *V. argentus*.

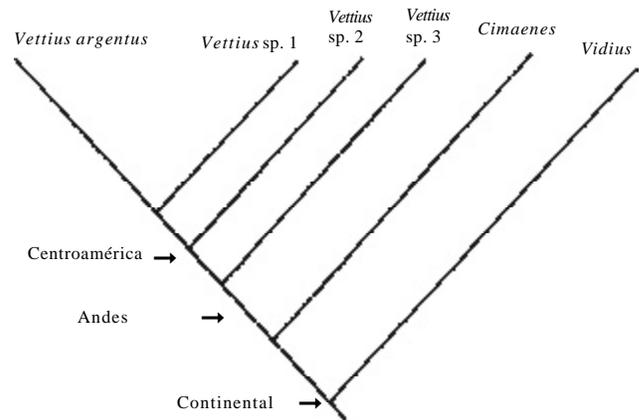


Figura 2. Cladograma hipotético sobre las relaciones internas dentro del complejo “*coryna*” y géneros relacionados.

El hecho que “*coryna*” no se extienda hacia las tierras bajas o planicies de la Región Amazónica, Orinoquía e incluso los valles interandinos de Cauca y Magdalena implica áreas de distribución restringidos sin que se hayan llevado a cabo procesos de dispersión hacia dichas regiones, esto como la explicación más parsimoniosa en el sentido de Halas *et al.* (2005). Sin embargo, Räsänen *et al.* (1995) y Webb (1995) presentan evidencia de tres masas continentales principales en Suramérica en el terciario tardío y rodeadas por masas de agua, lo cual impediría procesos de dispersión; aunque la distribución de “*coryna*” coincide con una de estas masas continentales, como los Andes, no explica la presencia de una especie relacionada en Centro América y su no presencia en la Amazonía, por ejemplo.

El segundo caso hace referencia al grupo “*phyllus*” (*Vettius lafrenaye* (Latreille, [1824]), *Vettius phyllus* (Cramer, 1777), *Vettius triangularis* (Hübner, [1831]), *Vettius crista* Evans, 1955 y *Vettius chagres* Nicolay, 1973), igualmente dentro del género *Vettius* (Figura 3). Aquí sus especies presentan una amplia distribución, la

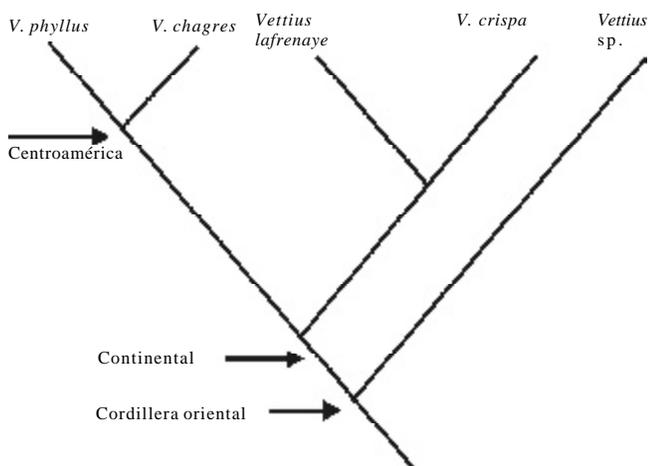


Figura 3. Cladograma hipotético sobre las relaciones internas dentro del grupo “*phyllus*”.

cual se extiende para toda la región Neotropical. Dentro de las especies observadas no se encontraron variaciones fuertes en las genitales de los machos, para individuos provenientes de los flancos de las tres cordilleras colombianas, lo cual sugiere que no han ocurrido eventos específicos fuertes de diferenciación.

Datos de distribución recopilados para otros taxones dentro de HesperIIDae, presentan áreas de distribución compartidas (Figura 4), como se observa para Heteropterinae con el género *Dalla* Mabille, 1904, un taxón que se distribuye para las partes altas de los Andes (Viloria *et al.*, 2008), *Serdis*, *Hylephyla* (*Hylephyla adriannae* MacNeill & Herrera, 1999 e *Hylephyla isonira* Dyar, 1913) y taxones con distribuciones principales en la región neártica *Poanes inimica* (Butler & Druce, 1872), *Poanes azin* (Godman, 1900), *Polites vibex* (Geyer, 1832), entre otros. De igual forma distribuciones disyuntas se observan entre Centroamérica y Suramérica, lo cual se observa en distintos taxones a lo largo del grupo.

Si bien los datos de distribución permiten ver que el Istmo de Panamá y el levantamiento de los Andes han generado patrones de divergencia supraespecíficos, a un nivel inferior aún no se puede separar un proceso de vicarianza, dispersión o simpatría, por ser eventos igualmente posibles, probablemente la utilización o cambio de plantas hospederas contribuyen en los patrones de diversificación dentro de HesperIIDae. En este sentido Janz *et al.* (2006) menciona un parecido entre la colonización y especialización de plantas hospederas y la hipótesis de “taxon pulses” y “taxon cycles”.

Si bien en los hesperidos no existen estudios sobre el proceso de diversificación de especies en relación con

sus plantas hospederas, un estudio de Peña (2007) demuestra el papel que han tenido las plantas hospederas sobre la radiación de especies de mariposas en Satyrinae; aunque no hay una relación cercana entre esta y HesperIIDae, comparten una característica fundamental: el cambio de plantas hospederas de dicotiledóneas a monocotiledóneas (Peña, 2007) que en el taxón de estudio corresponde a la transición observada entre “Pyrginae”, Heteropterinae y HesperIIDae en el Neotrópico, lo cual sugiere patrones similares en los patrones de diversificación de ambos grupos en especial relación con la expansión y diversificación de las gramíneas. Por el momento otros datos y un mayor conocimiento de la utilización de plantas hospederas pueden confirmar el enunciado anterior.

Es prioritario aumentar los trabajos de colección de HesperIIDae en Colombia, debido a la rareza ecológica, bajas abundancias en campo y hábitat restringidos para esclarecer patrones de distribución no resueltos aquí. Así mismo estudios sistemáticos y taxonómicos especialmente a nivel supraespecífico para determinar la riqueza real de especies, en un grupo que por su complejidad ha sido obviado de los estudios de mariposas diurnas. En conclusión, no se pueden proponer hipótesis biogeográficas para HesperIIDae en general, lo cual es explicado por otras disciplinas o metodologías.

Agradecimientos

A Lina Campos y Hannier Pulido, por permitirnos utilizar los datos de hesperidos de sus tesis de grado. A Jean F. Le Crom, José I. Vargas, Efraín Henao, John Jairo Quiroz, Martha Wolf por permitirnos el acceso a las colecciones para poder analizar la distribución de las especies y facilitarnos material. A Mónica Medina y Luz Amparo Triana, por las sugerencias hechas al texto. A John Lynch por sus comentarios que permitieron resolver algunas inquietudes de último momento y por último a Andrew Warren por la valiosa literatura que muy gentilmente nos suministró sobre los HesperIIDae neotropicales.

Bibliografía

- Andrade-C., M. G., 2002. Biodiversidad de las mariposas (Lepidoptera: Rhopalocera) de Colombia. pp. 153-172. En: Costa, C., Vanin, S.A. y Lobo, J. M. (Eds.). Proyecto de Red Iberoamericana de biogeografía y entomología sistemática PRIBES. Monografías Tercer Milenio. Zaragoza. 328 p.
- Andrade-C., M. G., Campos-Salazar, L. R., González-Montaña, I. A. y Pulido-B., H. W., 2007. Santa María, mariposas, alas y color. Serie Guías de Campo del Instituto de Ciencias Naturales No. 2. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia. 248 p.



Figura 4. Tres áreas de distribución hipotéticas para la familia Hesperiiidae en la región Neotropical (Centro América, Andes y tierras bajas). Las áreas son estimadas por lo que no representan distribuciones exactas y los sistemas insulares no son considerados.

- Austin, G.**, 1994. Hesperiidae of Central Rondônia, Brazil: comments on *Haemactis*, with description of a new species (Lepidoptera: Hesperiidae: "Pyrginae"). *Trop. Lepid.* **5**(2): 97-100.
- Bell, E. L.**, 1941. New species of Neotropical Hesperiidae (Lepidoptera: Rhopalocera). *American Museum Novitates.* (1125): 1-10.
- Brooks, D. R.**, 2005. Biogeografía histórica en la era de la complejidad: expansión e integración. *Rev. Mex. Biodiv.*, México **76**(5): 79-94.
- Brown, K. S.**, 1987. Biogeography and evolution of Neotropical butterflies. Whitmore, T. C. & G. T. Prance (Eds.) *Biogeography and quaternary history in tropical America.* Siarendon Press, pp. 66-99.
- Burns, J.**, 1989. Phylogeny and zoogeography of the bigger and better genus *Atalopedes* (Hesperiidae). *Jour. Lep. Soc.* **43**(1): 11-32.
- Burns, J.**, 1992. Genitalic recasting of *Poanes* and *Paratrytone* (Hesperiidae). *Jour. Lep. Soc.* **46**(1): 1-23.
- Callaghan, C. J.**, 1983. Notes on the zoogeographic distribution of butterflies of the subfamily Riodininae in Colombia. *Jour. Lep. Soc.* 1985. Supplement No. 1 Second Symposium on Neotropical Lepidoptera (Arequipa, Perú, 1983).
- Clarke, J.**, 1941. Preparation slides of the male genitalia of Lepidoptera. *Bull. Brooklyn. Entom., Soc.* **36** (4): 149-161.
- Chesser, T. and Zink, R.**, 1994. Modes of Speciation in Birds: A Test of Lynch's Method. *Evolution.* **48** (2): 490-497.
- Draudt, M., 1924.** B. Grypocera. 981-982 pp. In: Seitz, A. The Macrolepidoptera of World. Stuttgart, Alfred Kernen 5. 1141 p.
- Erwin, T. L.**, 1981. Taxon pulses, vicariance, and dispersal: an evolutionary synthesis illustrated by carabid beetles. In: Nelson, G. and Rosen, D.E., (Eds.), *Vicariance biogeography – a critique*, New York: Columbia University Press, 159-196.
- Evans, W.**, 1951. A catalogue of the American Hesperiidae indicating the classification and the nomenclature adopted in the British museum (Natural History) Part I. Introduction and group A. Pyrrhopygini. London. Birtish Museum (Natural History). 92 p.
- Evans, W.**, 1952. A catalogue of the American Hesperiidae indicating the classification and the nomenclature adopted in the British museum (Natural History) Part II. Pyrginae. Section I. London British Museum (Natural History). 178 p.
- Evans, W.**, 1953. A catalogue of the American Hesperiidae indicating the classification and the nomenclature adopted in the British museum (Natural History) Part III. Pyrginae. Section II. London Bristish Museum (Natural History). 246 p.
- Evans, W.**, 1955. A catalogue of the American Hesperiidae indicating the classification and nomenclature adopted in the British Museum (Natural History). Part IV: groups H-P, Hesperinae and Megathyminae. British Museum (Natural History), London. 588 p.
- Gallego, L.**, 1946. Catálogo de insectos determinados correspondientes a la orden Lepidoptera existentes en la sección de entomología de la Facultad Nacional de Agronomía-Medellín. Parte I. *Revista Facultad Nacional de Agronomía (Medellín)* **6** (23): 294-314.
- Godman, D and Salvin, O.**, 1901. *Insecta Lepidoptera-Rhopalocera.* Vol. II (1887-1901) 796 p. http://www.sil.si.edu/digital_collections/bca. Fecha última revisión: 29 de marzo de 2008. Fecha último acceso: [30 de abril de 2008].
- Halas, D., Zamparo, D. and Brooks, D.**, 2005. A historical biogeographical protocol for studyin biotic diversification by taxon pulses. *Journal of Biogeography.* **32** (2): 249-260.
- Hayward, K.** 1947. *Catalogus Hesperiidarum Reipublicae Colombianae.* *Acta Zoológica Lilloana.* (4): 201-392.
- Janz, N., Nylin, S. and Wahlberg, N.**, 2006. Diversity begets diversity: host expansions and the diversification of plant-feeding insects. *Evolutionary Biology*, (6): 4.
- Kimsey, L. S.**, 1992. Biogeography of the Panamanian region, from an insect perspective. In: Quintero, D., Aiello, A., (Eds.), *Insects of Panama and Mesoamerica*, pp. 14-24.
- Lamas, G.**, 2000. Estado actual del conocimiento de la sistemática de los lepidópteros, con especial referencia a la región Neotropical. *M3M PRIBES* (1): 253-260.
- Lamas, G. y Grados, J.**, 1996. Mariposas de la Cordillera del Sira, Perú (Lepidoptera: Papilionoidea y Hesperioidea). *Rev. Per. Ent.* (39): 55-61.
- Lattke, J. E.**, 2003. Biogeografía de las hormigas neotropicales. pp. 65-85. En: F. Fernández (Ed.). *Introducción a las hormigas de la región Neotropical.* Instituto de investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. Bogotá. 398 p.
- Llorente-Bousquets, J.; Luis-Martínez, A. y Vargas-Fernández, I.**, 1990. Catálogo sistemático de los Hesperioidea de México. Museo de Zoología. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de México. 70 p.
- Lynch, J. D.**, 1989. The gauge of speciation: on the frequencies of modes of speciation. pp. 527-553. In: D. Otte and J. A. Endler (eds.). *Speciation and its consequences.* Sinauer, Sunderland, Mass. 679 p.
- McNiell, D. and Herrera, J.**, 1998. Studies in the genus *Hylephila* Billberg, I. Introduction and the *Ignorans* and *Venusta* species groups (Hesperiidae: Hesperinae). *Jour. Lep. Soc.* **52**(3): 277-317.
- Mielke, O.**, 1989. Novas espécies de *Vidius* Evans e *Cobalopsis* Godman & Salvin do Brasil (Lepidoptera, Hesperiidae, Hesperinae). *Revta Bras. Zool.* **6**(4): 659-670.
- Mielke, O.**, 1994. Revisão de *Elbella* Evans e géneros afins (Lepidoptera, Hesperiidae, Pyrrhopygini). *Revta. Bras. Zool.* **11** (3): 395-586.
- Mielke, O.**, 2004. Hesperioidea. En: G. Lamas (ed.). *Atlas of Neotropical Lepidoptera Checklist: Part 4A.* *Trop. Lepid. USA.* 439 p.
- Mielke, O.**, 2005. Catalogue of the America, Hesperioidea, Hesperiidae. Lepidoptera. Hesperinae. *Sociedad Brasileira de Zoologia.*
- Monroe, R. and Miller, L.**, 1967. Report on a collection of Hesperiidae from Honduras. *Jour. Lep. Soc.* **21**(4): 243-247.

- Nicolay, S.**, 1973. Descriptions of new Neotropical HesperIIDae. Jour. Lep. Soc. 27(4):243-257, 35 figs. (30 november).
- Peña, C.**, 2007. Butterflies and grasses: evolutionary history of the subfamily Satyrinae. Department of Zoology, Stockholm University, Stockholm, SWEDEN. April 2007. Licentiate thesis. 77 p.
- Pulido-B., H. y Andrade-C., M. G.**, 2007. Mariposas de las partes altas de Perijá, pp. 23-28. En: Colombia, Diversidad Biótica V, la alta montaña de la Serranía de Perijá. J. O. Rangel-Ch. (Ed.). Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá. 492p.
- Räsänen, M., Linna, A., Santos, J., and Negri, F.**, 1995. Late Miocene Tidal Deposits in the Amazonian Foreland Basin. Science **269** (5222): 386 – 390.
- Salazar, J. A. y Vargas, J. I.**, 2002. Mariposas Colombianas III. Noticias sobre algunos Grypocera raros o poco conocidos en Colombia. Boletín Científico, Centro de Museos, Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas, 6: 29-39.
- Shuey, J.**, 1993. Phylogeny and biogeography of *Euphyes* Scudder (HesperIIDae). Jour. Lep. Soc. **47**(4): 261-278.
- Steinhauser, S.**, 1986. A review of the skippers of the *Narcosius* group of species of the genus *Astraptes* Hübner (*sensu* Evans, 1952) and erection of a new genus. Lepidoptera: HesperIIDae. Bull. Allyn Mus. (104): 1-36.
- Steinhauser, S.**, 1989. Taxonomic notes and descriptions of new taxa in the Neotropical HesperIIDae. Part I. Pyrginae. Bull. Allyn Mus. 127: 1-70.
- Steinhauser, S.**, 1991. Taxonomic notes and descriptions of the new taxa in Neotropical HesperIIDae, Part II. Bull. Allyn Mus. (132): 76.
- Vargas, J. I. y Salazar, J. A.**, 2006. Mariposas colombianas VIII, Noticias sobre otros Grypocera rara vez observados en Colombia (Insecta: Lepidoptera). Boletín Científico, Centro de Museos, Museo de Historia Natural, Universidad de Caldas, 10: 199-208.
- Viloria, A., Warren, A.D. and Austin, G.**, 2008. A spectacular new *Dalla* Mabille, 1904 from Venezuela-Colombia (HesperIIDae: Heteropterinae). Bull. Allyn Mus. 156: 1-10.
- Warren, A. D.**, 2000. Hesperioidea (Lepidoptera). pp. 535-580 In: Llorente Bousquets, J.E., González Soriano, E., Papavero, N. (Eds.), Biodiversidad, Taxonomía y Biogeografía de Artrópodos de México: Hacia una Síntesis de su Conocimiento, Vol. II. Universidad Nacional Autónoma de México, México City, 676 p.
- Warren, A. D., Ogawa, J. and Brower, A.**, 2008. Phylogenetic relationships of subfamilies and circumscription of tribes in the family HesperIIDae (Lepidoptera: Hesperioidea). Cladistics 24:1-35.
- Webb, S.**, 1995. Biological Implications of the Middle Miocene Amazon Seaway. Science **269** (5222):61-362.
- Wilson, E.** 1961. The nature of the taxon cycle in the Melanesian ant fauna. The American Naturalist, **95**(882): 169-193.

Recibido: septiembre 25 de 2008.

Aceptado para su publicación: noviembre 13 de 2008.

APÉNDICE I
LISTADO DE ESPECIES Y SUBESPECIES DEPOSITADOS EN LA COLECCIÓN DE
ENTOMOLOGÍA DEL INSTITUTO DE CIENCIAS NATURALES DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL DE COLOMBIA

Heteropteriinae

Dalla bos Steinhauser, 1991**Dalla calima* Steinhauser, 1991**Dalla frater* (Mabille, 1878)*Dalla dimidiatus* (C. Felder & R. Felder, 1867)*Dalla pura* Steinhauser, 1991**Dalla puracensis* Steinhauser, 1991**Dalla semiargentea* (C. Felder & R. Felder, 1867)*Dalla simplicis* Steinhauser, 1991**Dalla superior* Draudt, 1923*Dalla xantha* Steinhauser, 1991**Dalla superargentea* Vilorio, Warren & Austin, 2008*Panoquina luctuosa* (Herrich-Schäffer, 1869)**Tromba xanthura* (Godman, 1901)**Saliana esperi* Evans, 1955*Saliana placens* (Butler, 1874)*Saliana severus* (Mabille, 1895)*Talides alternata* Bell, 1941

Tribu Anthoptini

Anthoptus epictetus (Fabricius, 1793)*Corticea mendica* (Mabille, 1898)*Corticea schwarzi* (Bell, 1941)*Falga jeconia* (Butler, 1870)*Linka lina* (Plötz, 1883)**Sinapte malitiosa* (Herrich-Schäffer, 1865)*Wahydra subhebetis* Steinhauser, 1991*Zalomes allynorum* (L.D., Miller & J.Y. Miller, 1972)*Zalomes cordillera* (L.D., Miller & J.Y. Miller, 1972)

Hesperiinae

Tribu Erionotini

Alera vulpina (C. Felder & R. Felder, 1867)*Orses itea* (Swainson, 1821)

Tribu Thymelicini

Ancyloxypha melanoneura (C. Felder & R. Felder, 1867)

Tribu Calpodini

Calpodes ethlius (Stoll, 1782)*Carystoides noseda* (Hewitson, 1866)*Cobalus calvina* (Hewitson, 1866)*Cobalus virbius* (Cramer, 1777)*Panoquina fusina* (Hewitson, 1868)*Panoquina ocola* (W. H. Edwards, 1863)*Panoquina lucas* (Fabricius, 1793)

Tribu Moncini

Apaustus gracilis (C. Felder & R. Felder, 1867)*Atalopedes campestris* (Boisduval, 1852)*Atalopedes clarkei* Burns, 1989*Callimormus corades* (C. Felder, 1862)*Cobalopsis nero* (Herrich-Schäffer, 1869)*Dion carmenta* (Hewitson, 1870)*Enosis aphilos* (Herrich-Schäffer, 1869)*Euptychide complana* (Herrich-Schäffer, 1869)*Lento lento* (Plötz, 1884)

- Lerema lumina* (Herrich-Schäffer, 1869)
- Mnestheus ittona* (Butler, 1870)
- Naevolus orius* (Mabille, 1883)
- Niconiades merenda* (Mabille, 1878)
- Pamba boyaca* Nicolay, 1973
- Papias subcostulata* (Herrich-Schäffer, 1870)
- Papias phainis* Godman, 1900
- Parphorus decora* (Herrich-Schäffer, 1869)
- Perichares butus* (Möschler, 1877)
- Perichares deceptus* (Butler & H. Druce, 1872)
- Perichares philetus* (Gmelin, [1790])
- Sacrator sacrator* (Godman & Salvin, 1879)*
- Vehilius stictomenes illudens* (Mabille, 1891)
- Vehilius vetula* (Mabille, 1878)
- Vettius artona* (Hewitson, 1868)
- Vettius aurelius* (Plötz, 1882)
- Vettius crispa* Evans, 1955
- Vettius coryna catargyra* (C. Felder & R. Felder, 1867)
- Vettius coryna coryna* (Hewitson, 1866)
- Vettius lafrenaye* (Latreille, [1824])
- Vettius marcus* (Fabricius, 1787)
- Vettius phyllus* (Cramer, 1777)
- Tribu Hesperini
- Conga chydæa* (Butler, 1877)
- Cynea hycsos* (Mabille, 1861)
- Euphyes peneia* (Godman, 1900)
- Hylephila isonira* Dyar, 1913
- Hylephila adriennae* McNiell & Herrera, 1998
- Hylephila phyleus* (Drury, 1773)
- Metron leucogaster* (Godman, 1900)
- Molo mango* (Guenée, 1865)
- Nyctelius nyctelius* (Latreille, [1824])
- Poanes azin* (Godman, 1900)
- Poanes inimica* (Butler & H. Druce, 1872)
- Poanes melane* (W.H. Edwards, 1869)
- Poanes macneilli* Burns, 1992
- Polites vibex* (Geyer, 1832)
- Pompeius pompeius* (Latreille, [1824])
- Serdis viridicansviridicans* (C. Felder & R. Felder, 1867)
- Serdis viridicanskirschi* (Weymer, 1890)
- Thespius inez* Nicolay, 1973*
- Thespius othna* (Butler, 1870)
- Wallengrenia otho* Evans, 1955
- Xeniades chalestra* (Hewitson, 1866)
- Telles arcalaus* (Stoll, 1782)*
- Neoxeniades scipio luda* (Hewitson, 1877)*
- Subfamilia "Pyrginae"
- Tribu Pyrrhopygini
- Myscelus amystis* (Hewitson, 1857)
- Passova gazera* (Hewitson, 1866)
- Passova passova* (Hewitson, 1866)
- Aspitha aspitha* (Hewitson, 1866)
- Amenis pionia* (Hewitson, 1857)
- Chalypyge zereda* (Hewitson, 1886)
- Elbella intersecta* (Herrich-Schäffer, 1869)
- Elbella patrobas* (Hewitson, 1857)
- Elbella scylla* (Ménétriés, 1855)
- Elbella blanda* Evans, 1951*
- Elbella miodesmiata* (Röber, 1925)*
- Elbella theseus* (Bell, 1934)*
- Elbella merops* (Bell, 1934)*
- Elbella lustra* Evans, 1951*

- Elbella azeta* (Hewitson, 1866)*
Elbella etna Evans, 1951*
Elbella patroclus (Plötz, 1879)*
Jemadia hospita (Butler, 1877)
Jemadia gnetos (Fabricius, 1781)
Mimoniades nurscia (Swainson, 1821)
Mimardaris aerata (Godman & Salvin, 1879)
Mysoria barcastus (Sepp, [1851])
Parelbella ahira (Hewitson, 1866)*
Pyrrhopyge bouletti Le Cerf, 1922
Pyrrhopyge decipiens (Mabille, 1903)
Pyrrhopyge phidias (Linnaeus, 1758)
Yanguna cosyra (H. Druce, 1875)
- Tribu Eudamini
- Astrartes alardus* (Stoll, 1790)
Astrartes chiriquensis (Staudinger, 1876)
Astrartes fuligator (Walch, 1775)
Augiades crinismus (Cramer, 1780)
Augiades epimethea (Plötz, 1883)
Autochton bipunctatus (Gmelin, [1790])
Autochton longipennis (Plötz, 1882)
Autochton zarex (Hübner, 1818)
Autochton neis (Geyer, 1832)
Bungalotis midas (Cramer, 1775)
Chioides catillus (Cramer, 1779)
Chioides zilpa (Butler, 1872)
Dyscophellus phraxanor (Hewitson, 1876)
Dyscophellus porcius (C. Felder & R. Felder, 1862)
Dyscophellus ramusis (Stoll, 1781)
Entheus gentius (Cramer, 1777)
Entheus matho Godman & Salvin, 1879
- Entheus priassus* (Linnaeus, 1758)
Epargyreus socus (Hübner, [1825])
Hyalothyruis infernalis (Möschler, 1877)
Narcosius parisi parisi (R. C. Williams, 1927)
Narcosius colossus (Herrich-Schäffer, 1869)
Oileides azines (Hewitson, 1867)
Phanus vitreus (Stoll, 1781)
Phocides pigmalion (Cramer, 1779)
Phocides thermus (Mabille, 1883)
Phocides thermus valgus (Mabille, 1883)
Polythrix octomaculata (Sepp, [1844])
Proteides mercurius (Fabricius, 1787)
Urbanus carmelita (Herrich-Schäffer, 1869)
Urbanus dorantes (Stoll, 1790)
Urbanus simplicius (Stoll, 1790)
Urbanus teleus (Hübner, 1821)
Urbanus viterboana (Ehrmann, 1907)
Thessia athesis (Hewitson, 1867)*
Typhedanus crameri McHenry, 1960
Venada advena (Mabille, 1889)
- Tribu Pyrgini
- Achlyodes busirus* (Cramer, 1779)
Achlyodes pallida (R. Felder, 1869)
Achlyodes mithridates thraso (Hübner, [1807])
Aethilla lavochrea (Butler, 1870)
Aethilla memmius Butler, 1870
Anastrus tolimus (Plötz, 1884)
Anastrus obscurus Hübner, [1824]
Anastrus sempiternus (Butler & H. Druce, 1872)
Anisochoria pedalioidina (Butler, 1870)
Bolla atahuallpai (Lindsey, 1925)

- Bolla cupreiceps* (Mabille, 1891)
Bolla giselus (Mabille, 1883)
Ebrietas anacreon (Staudinger, 1876)
Ephyriades arcas (Drury, 1773)
Ephyriades zephodes (Hübner, [1825])
Carrhenes canescens (R. Felder, 1869)
Carrhenes sinesinus Steinhauser, 1989
Chiomara asychis (Stoll, 1780)
Cogia grandis Riley, 1921
Cycloglypha thrasibulus (Fabricius, 1793)
Diaeus variegata (Plötz, 1884)
Gindanes brebisson (Latreille, [1824])
Grais stigmaticus Mabille, 1883)
Gorgythion begga (Prittowitz, 1868)
Gorgythion plautia (Möschler, 1877)
Haemactis pyrrhosphanes Lindsey, 1919
Haemactis sanguinalis (Westwood, 1852)
Heliopetes alana (Reakirt, 1868)
Heliopetes arsalte (Linnaeus, 1758)
Heliopetes laviana (Hewitson, 1868)
Heliopetes laviana leca (Butler, 1870)
Heliopyrgus domicella (Erichson, [1849])
Milanion hemes (Cramer, 1777)
Mylon cajus (Plötz, 1884)
Mylon lassia (Hewitson, 1868)
Mylon maimon (Fabricius, 1775)
Nisoniades ephora (Herrich-Schäffer, 1870)
Nisoniades suprapanama Steinhauser, 1989
Noctuana haematospila (C. Felder & R. Felder, 1867)
Noctuana noctua (C. Felder & R. Felder, 1867)
Ouleus fridericus (Geyer, 1832)
Ouleus negrus cristatus Steinhauser, 1989
Ouleus fatinitza (Plötz, 1884)
Ouleus calavius (Godman & Salvin, 1895)
Paches loxus (Westwood, 1852)
Phareas coeleste (Westwood, 1852)
Potamanaxas laoma fumida (Draudt, 1922)
Potamanaxas laoma violacea (Dognin, 1888)
Potamanaxas melicertes (Godman & Salvin, 1895)
Potamanaxas hirta (A. G. Weeks, 1901)
Pyrgus orcus (Stoll, 1780)
Pyrgus oileus (Linnaeus, 1767)
Pythonides herennius Geyer, [1838]
Pythonides jovianus amaryllis Staudinger, 1876
Pythonides jovianus (Stoll, 1782)
Pythonides lerina (Hewitson, 1868)
Quadrus contubernalis (Mabille, 1883)
Quadrus lugubris (R. Felder, 1869)
Quadrus truncata (Hewitson, 1870)
Sostrata grippa Evans, 1953
Spathilepia clonius (Cramer, 1775)
Staphylus mazans (Reakirt, [1867])
Staphylus tridentis Steinhauser, 1989*
Staphylus lizeri (Hayward, 1938)
Theagenes aegides (Herrich-Schäffer, 1869)
Theagenes albiplaga (C. Felder & R. Felder, 1867)
Zera nolckeni (Mabille, 1891)

* Especies reportadas en la literatura (ver apartado de Métodos y materiales) para Colombia con datos de localidad precisos, no depositados en la colección del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.