

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXVI

MARZO DE 2012

NÚMERO 138

DIRECTORA DE PUBLICACIONES: MARGARITA PEREA DALLOS



## CONTENIDO - CONTENTS

Pág.	Pág.
<b>Botánica (Botany)</b>	
Primer registro de <i>Chrysopogon aciculatus</i> (Poaceae: Panicoideae: Andropogoneae) en sudamérica [First report of <i>Chrysopogon aciculatus</i> (Poaceae: Panicoideae: Andropogoneae) in South America] <i>Diego Giraldo Cañas</i> .....5	<b>Historia de la Ciencia</b> Comentarios acerca de la recepción de la teoría de Charles Darwin en Colombia Comments on the reception of the theory of evolution of Charles Darwin in Colombia <i>Santiago Díaz Piedrahita</i> .....79
<b>Física (Physics)</b>	
Acoplamiento de plasmones localizados en nanosistemas [Localized plasmon coupling in nanosystems] <i>Angela S. Camacho B.</i> .....15	<b>Matemáticas (Mathematics)</b> Aplicaciones del modelado matemático en problemas energéticos: un recorrido desde la investigación a la creación de empresas [Applications of mathematical models in energy problems: from research to spin-off generation] <i>Pedro Fernández de Córdoba Castellá</i> .....93
Identificando el inflatón con el bosón de higgs del modelo estándar [Identifying the inflaton with the standard model higgs boson] <i>César D. Peralta, Yeinzon Rodríguez</i> .....25	<b>Química</b> Evaluación de los parámetros fisicoquímicos de plaguicidas utilizados en salud pública [Evaluation of physicochemical parameters of pesticides used in public health] <i>Luis Alberto Chávez Almazán, Gustavo Pérez Rendón, Jesús Antonio Díaz Ortiz, Mario Alberto Alarcón Romero, Saúl López Silva</i> .....105
Magnetron Desbalanceado: Configuración del Campo Magnético y su correlación con el campo de 2 espiras concéntricas [Unbalanced Magnetron: Magnetic Field Configuration and correlation with the field of 2 concentric coils] <i>Ulises Piratoba Morales, Álvaro Mariño Camargo y Jhon Jairo Olaya Flórez</i> .....37	Procesos para la captura de CO <sub>2</sub> . Emisión de óxidos de nitrógeno y de azufre durante la oxi-combustión de un carbonizado [Processes for CO <sub>2</sub> capture. Nitrogen and sulphur oxides emission during char oxy-combustion] <i>Astrid Sánchez, Eric Eddings, Fanor Mondragón</i> .....115
<b>Fitopatología (Plant Pathology)</b> Efectividad de la sanidad de cormos de plátano dominico hartón ( <i>Musa AAB Simmonds</i> ), sobre nematodos fitoparásitos y rendimiento del cultivo [Effectiveness of sanitation of corms of dominico hartón plantain ( <i>Musa AAB</i> ), on plant parasitic nematodes and crop's yield] <i>Óscar Adrián Guzmán Piedrahita, Jairo Castaño Zapata, Bernardo Villegas Estrada</i> .....45	<b>Constitución de la Academia</b> (Members of the Academy) .....125
<b>Geología (Geology)</b> Historia Geológica del Bosque Húmedo Neotropical [Geological history of the neotropical rainforest] <i>Carlos Jaramillo</i> .....57	<b>Publicaciones de la Academia</b> (Publications of the Academy) .....127

# PRIMER REGISTRO DE *CHRYSOPOGON ACICULATUS* (POACEAE: PANICOIDEAE: ANDROPOGONEAE) EN SUDAMÉRICA\*

Diego Giraldo-Cañas\*\*

## Resumen

**Giraldo-Cañas, D.:** Primer registro de *Chrysopogon aciculatus* (Poaceae: Panicoideae: Andropogoneae) en Sudamérica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (138): 5-14, 2012. ISSN 0370-3908.

Se registra para Sudamérica la especie paleotropical *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin. Se presentan por primera vez las características micromorfológicas y anatómicas de sus estructuras vegetativas y reproductivas.

**Palabras clave:** Chrysopogon, flora de Colombia, flora de Sudamérica, gramíneas neotropicales, gramíneas paleotropicales.

## ABSTRACT

*Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin., a Paleotropical species, is reported for the first time for South America. The micromorphological and anatomical features of its vegetative and reproductive structures are given for the first time.

**Key words:** Chrysopogon, Flora of Colombia, Flora of South America, Neotropical grasses, Paleotropical grasses.

## Introducción

El género *Chrysopogon* Trin. (incluido *Vetiveria* Bory) está representado por cerca de 36 especies tropicales y subtropicales del Viejo Mundo. Se caracteriza por sus panojas con racimos verticilados con espiguillas

comprimidas lateralmente, pareadas o en tríadas, caso en el cual están constituidas por una espiguilla sésil y dos espiguillas pediceladas; las espiguillas sésiles son perfectas, mientras que las pediceladas son neutras o estaminadas. Muchos agrostólogos separan *Chrysopogon* de *Vetiveria*, pero su distinción es arbitraria,

\* Contribución derivada del proyecto "Estudios morfológicos, anatómicos y taxonómicos en gramíneas neotropicales", de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá D. C.

\*\* Instituto de Ciencias Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 7495, Bogotá D. C., Colombia. Correo electrónico: dagiraldoc@unal.edu.co

ya que hay especies intermedias que no permiten tal delimitación (Clayton & Renvoize, 1999; Veldkamp, 1999). Por tal razón, se siguió la propuesta de Veldkamp (1999) y Zuloaga *et al.* (2003) de combinar ambos géneros.

Aquí se documenta el hallazgo para Sudamérica de *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin., una gramínea paleotropical. Así, se contribuye con el inventario de la flora de Colombia, considerada la segunda a nivel mundial después de la de Brasil (Díaz Piedrahita, 2002; Groombridge & Jenkins, 2002; Rangel-Ch., 2006).

### Materiales y métodos

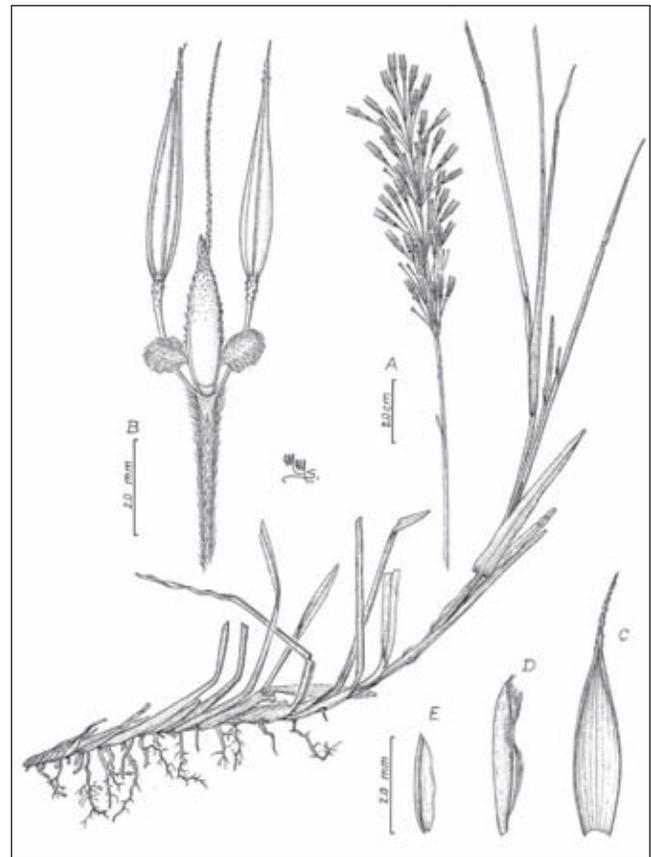
**estudios exomorfológicos:** Las técnicas utilizadas corresponden a las empleadas clásicamente en taxonomía y sistemática biológicas (Giraldo-Cañas & Peterson, 2009). Se siguió el concepto morfológico de especie, con base en las consideraciones presentadas en Giraldo-Cañas & Peterson (2009). La terminología de las estructuras morfológicas planas y tridimensionales está basada en la terminología clásica agrostológica, excepto en lo que tiene que ver con los términos **caña** (= culmo), **entrenudo** (= internodio), **estolonífero** (= cundidor), **nervios** (= venas), **aparatos estomáticos** (al describir los estomas se utilizó el término *aparatos estomáticos*, que incluye las células oclusivas, las células subsidiarias, el ostiolo o estoma, así como la cámara subestomática), **tricomas** (= pelos), **asperezas** (término empleado para referirse en forma conjunta a agujones y ganchos), **fitolitos** (= biolitos, microfitolitos o silicofitolitos), **panoja** (= panícula o paniculodio), **espiguilla** (= espícula o florescencia), **lema** (= lemma), **antecio** (= flósculo) y **cariopsis** (= cariopse o cariósipide). Los términos escritos en negrilla corresponden a las formas castellanas adoptadas en la agrostología moderna (Giraldo-Cañas, 2011).

**estudios micromorfológicos y anatómicos de la lámina foliar, la espiguilla y los antecios:** Las muestras de láminas foliares, espiguillas, brácteas y antecios –para las observaciones con los microscopios óptico “MO” (Instituto de Ciencias Naturales) y electrónico de barrido “MEB” (Dirección Académica CEIF de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá)– se obtuvieron de material seco de herbario. Las muestras para el MEB se montaron en microdiscos metálicos, los que se recubrían con una cinta de doble faz, la cual permite la adherencia de las muestras, tanto vegetativas (láminas foliares) como reproductivas (espiguillas,

pedicelos, brácteas, antecios, estambres). En vista de que el MEB es ambiental, no se necesitó recurrir a la metalización de las muestras. Cabe destacar que las láminas foliares obtenidas, tanto para las observaciones con MO como con MEB, corresponden a la antepenúltima hoja de una innovación fértil, y las estructuras reproductivas corresponden a panojas maduras. La terminología para los fitolitos y las demás estructuras anatómicas está basada en Ellis (1979), Zucol (1996), Madella *et al.* (2005) y Erra (2010).

### Resultados y discusión

***Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin.**, Fund. Agrost. 188. 1820. *Andropogon aciculatus* Retz., Observ. Bot. 5: 22. 1789. **t IPO: In DIA.** Koenig s.n. in herb. Retzius [lectotipo LD, designado por Veldkamp, Austrobaileya 5 (3): 509. 1999]. **Figuras 1–6.**



**Figura 1.** *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin. **A.** Hábito e inflorescencia; **B.** Espiguillas en tríadas (una espiguilla sétil y dos espiguillas pediceladas) (nótese la espiguilla sétil con dos estigmas); **C.** Gluma superior de una espiguilla pedicelada; **D.** Lema inferior de una espiguilla sétil; **e.** Pálea superior [todo de C. Lastra-Romero et al. 538 (COL)].

**Características generales:** Esta especie es perenne y rizomatosa (Fig. 1A) y es fácilmente reconocible por sus panojas con racimos verticilados (Fig. 1A), los cuales están reducidos a una tríada de una espiguilla sésil y dos espiguillas pediceladas (Figs. 1B, 2). Las espiguillas, cuando están en fruto, se adhieren a la piel de los animales y a las ropas, debido a la notable cantidad de asperezas en sus aristas y gluma inferior y tricomas en el callo (Figs. 1B, 2). **Hitchcock** (1922), **Häfliger & scholz** (1980), **Davidse** (1994), **Poilecot** (1995), **Veldkamp** (1999) y **Quattrocchi** (2006), han publicado completas descripciones macromorfológicas de esta especie. Una lista completa de los sinónimos de *C. aciculatus* puede encontrarse en **Zuloaga et al.** (2003) y **Quattrocchi** (2006).

**Características micromorfológicas y anatómicas:** Aquí se presentan, por primera vez, las características micromorfológicas y anatómicas de *C. aciculatus*, como un aporte al estudio de esta interesante especie paleotropical. A pesar de su amplia distribución en el paleotrópico y su importancia como planta invasora, esta especie nunca se había estudiado a partir de su micromorfología y anatomía [véanse **Metcalfe** (1960), **ellis** (1979), **Palmer & tucker** (1981, 1983), **Palmer et al.** (1985), **Palmer & Gerbeth-Jones** (1986, 1988), **Veldkamp**, 1999]. A continuación se destacan algunas características de su micromorfología y anatomía.

**espiguillas sésiles:** Las espiguillas sésiles son perfectas, comprimidas lateralmente, angostamente lanceoladas a lineares (Fig. 1B), con el callo alargado, oblicuo, punzante y piloso, con los tricomas pardo-amarillentos (Figs. 1A, 2A-B), la gluma inferior es cartilaginosa, de ápice truncado, espinulosa en los márgenes desde la porción medial hasta la distal (Figs. 2C-E), mientras que la gluma superior es aristada. Las espiguillas sésiles poseen dos antecios, el inferior es neutro con la lema inferior hialina, enervia y ciliada, y pálea inferior ausente, y el antecio superior es perfecto, éste posee tres estambres y dos estigmas plumosos (Figs. 1B, 2A, 3E); la lema superior es hialina, ciliada y largamente aristada.

**espiguillas pediceladas:** Las espiguillas pediceladas son estaminadas o neutras, angostamente lanceoladas a lineares y de pedicelos glabros (aunque con asperezas en su extremo distal) y libres (Figs. 1B, 2F).

**Fitolitos:** Los fitolitos son cuerpos líticos que se componen de un gel de sílice, una forma de sílice amorfo hidratado o ácido silícico polimerizado, impurificado

por la presencia de diversos elementos químicos, tales como hierro, potasio, etc., y son consecuencia de un proceso de mineralización (**Zucol**, 1996; **erra**, 2010). Su composición, además de ser silíceas (silicofitolitos o cuerpos silíceos), puede corresponder a carbonato de calcio (cristales de carbonato, o impregnaciones sobre membranas: cistolitos), como también a oxalato de calcio (cristales). Los fitolitos de las gramíneas se originan mayoritariamente en los tejidos epidérmicos, subepidérmicos y esclerenquimáticos y poseen características morfológicas que los diferencian del resto del reino vegetal (**Zucol**, 1996).

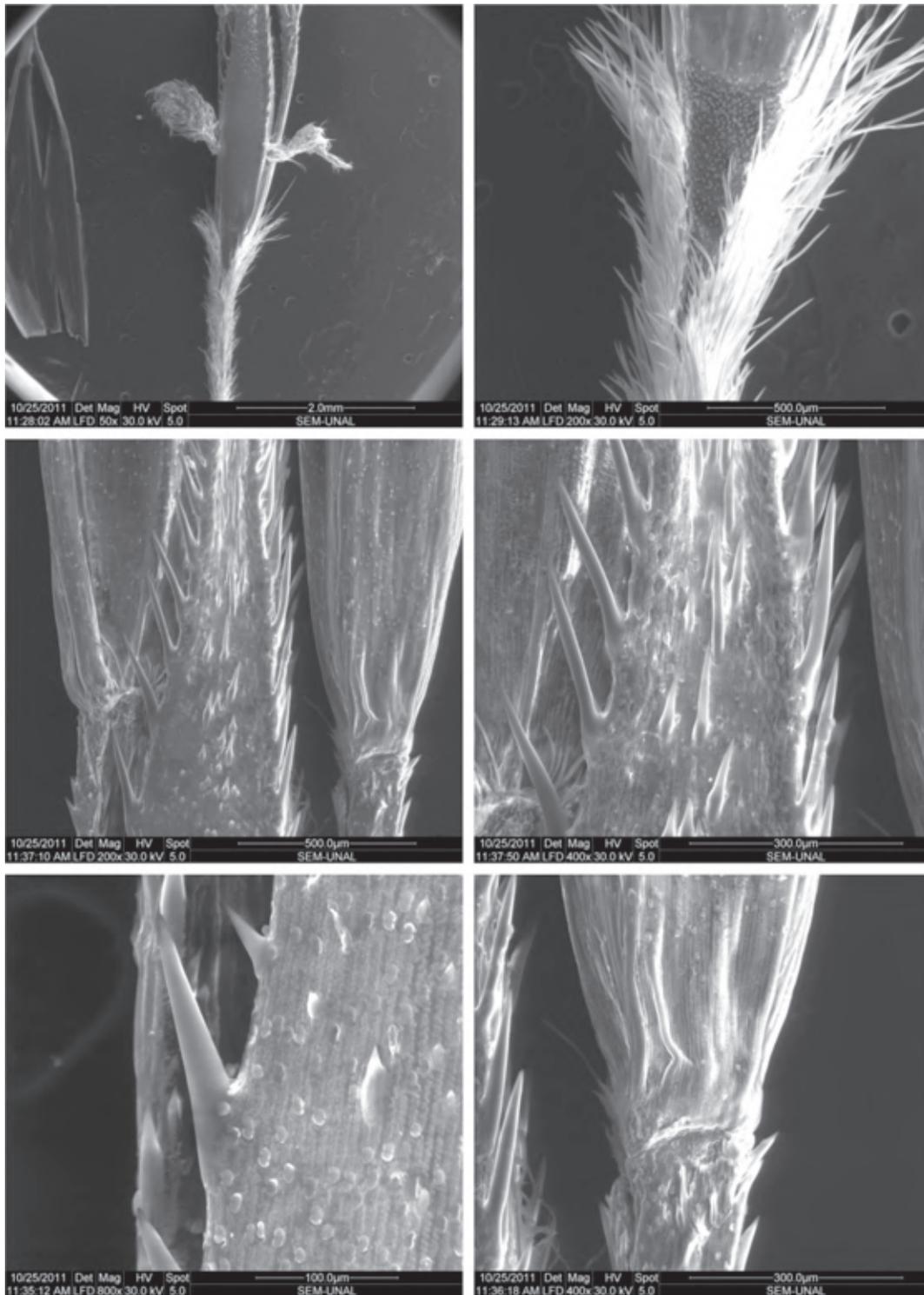
Los fitolitos encontrados corresponden a tres tipos: halteriformes simples de centro corto y final convexo (clase panicoide), en cruz gruesa (clase panicoide) y circulares (clase pooide) (*sensu* **Zucol**, 1996) (Figs. 4 y 6). Los fitolitos halteriformes simples son más abundantes –tanto en las espiguillas como en la lámina foliar– que los que presentan forma de cruz gruesa y éstos a su vez, son más frecuentes que los circulares (Figs. 4 y 6).

Todas las características antes mencionadas, se ajustan a las encontradas en otras especies de la subfamilia Panicoideae, principalmente en lo que tiene que ver con la naturaleza, la forma y la frecuencia de los aparatos estomáticos, los tricomas bicelulares y los fitolitos halteriformes simples (**Metcalfe**, 1960; **ellis**, 1979; **Palmer & tucker**, 1981, 1983; **Palmer et al.**, 1985; **Palmer & Gerbeth-Jones**, 1986, 1988).

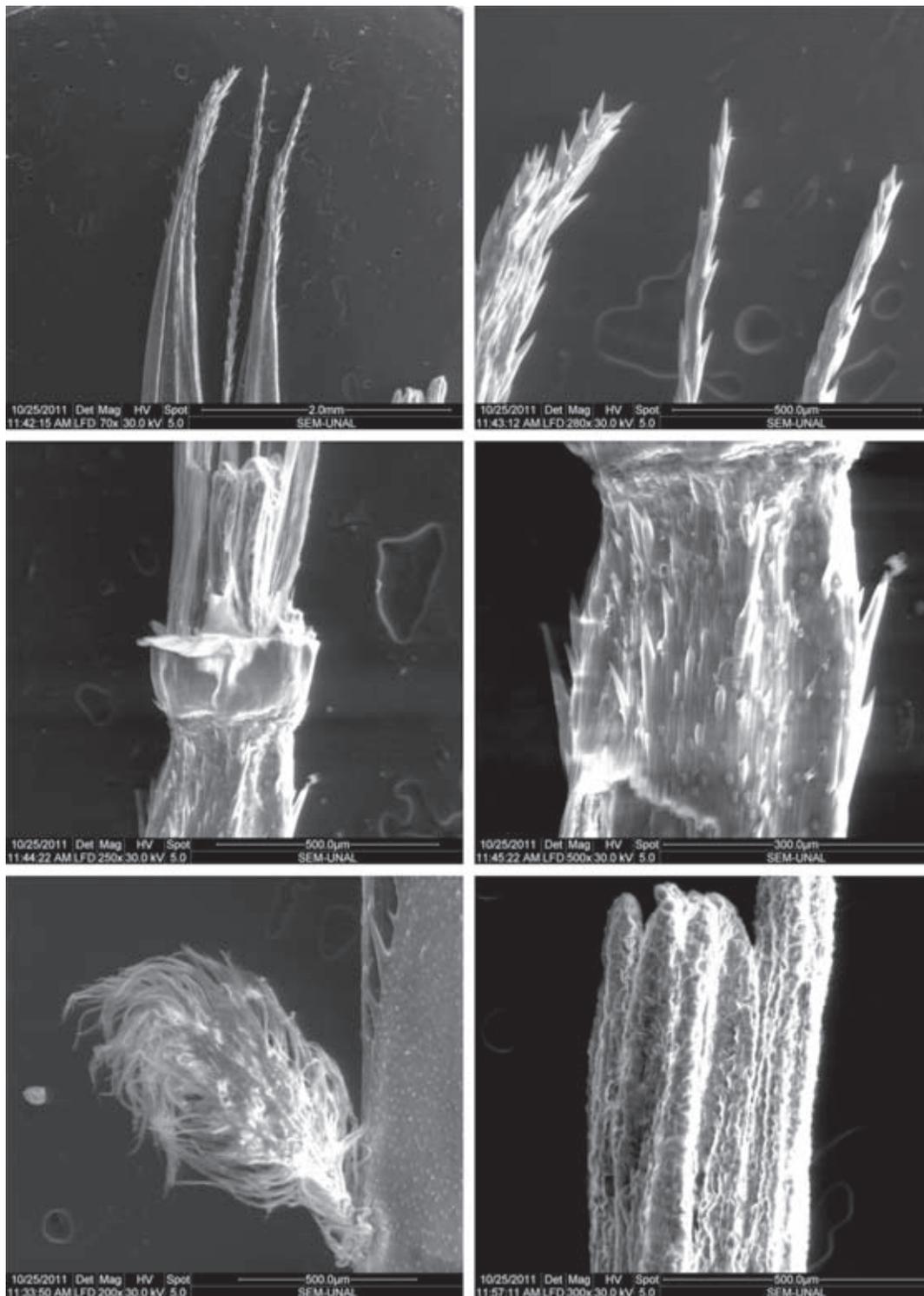
**etimología:** El nombre deriva de los vocablos griegos *chrysos* (oro) y *pogon* (barba), en clara referencia al color de las aristas y los tricomas pardo-amarillentos del callo (**Quattrocchi**, 2006).

**nombres populares:** Guerrilla (*Lastra-Romero et al.* 538), en otros países le llaman amorseco (**Quattrocchi**, 2006).

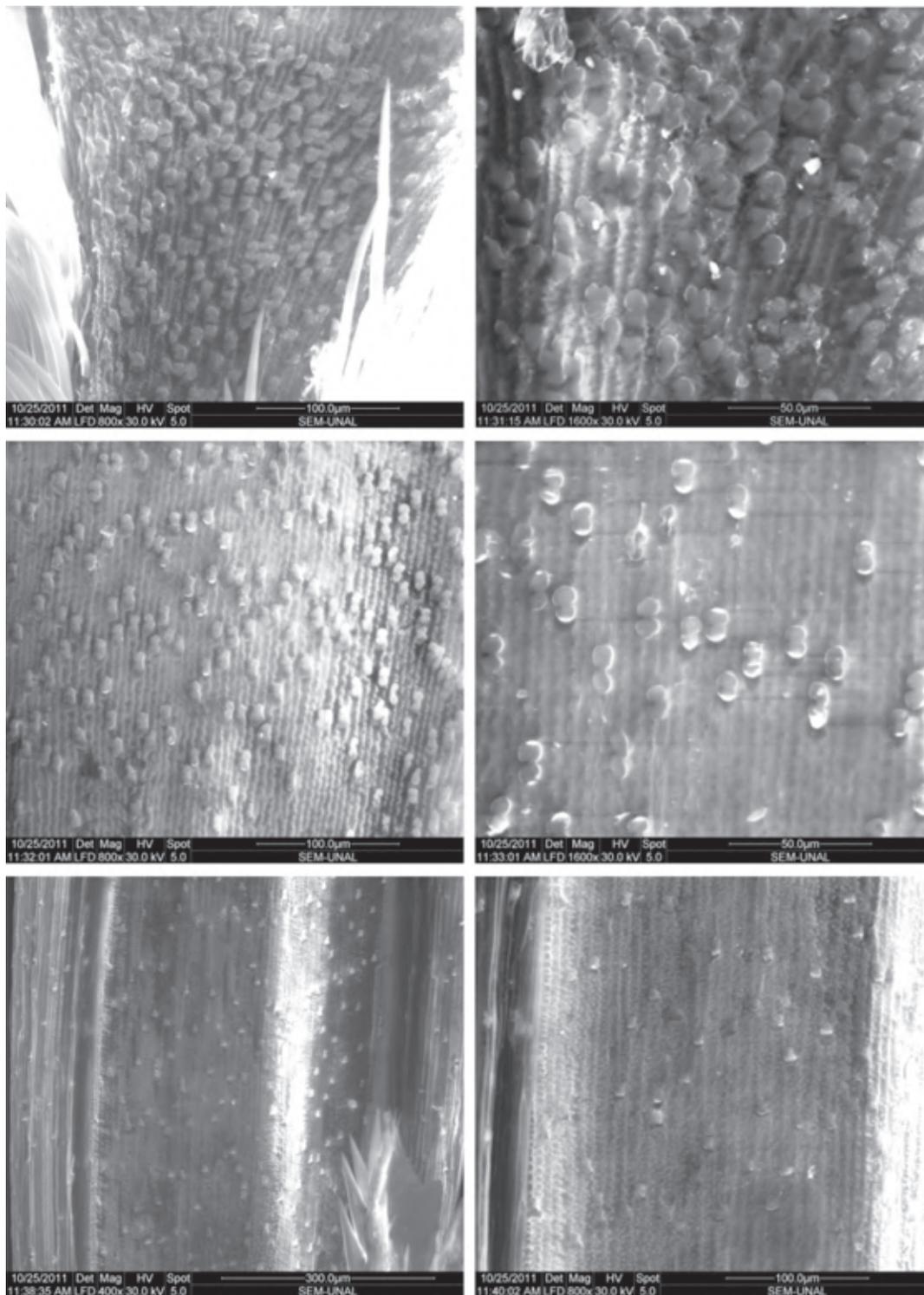
**Distribución geográfica y ecológica:** *Chrysopogon aciculatus* es una especie nativa de Asia tropical, introducida y naturalizada en África tropical (**Häfliger & scholz**, 1980; **Davidse**, 1994; **Poilecot**, 1995; **Veldkamp**, 1999; **Quattrocchi**, 2006), Asia Menor, Irán, Rusia (**t zvelev**, 1999), así como en Hawai (**Hitchcock**, 1922). En el continente americano, sólo había sido registrada en Panamá (**Davidse**, 1994; **Zuloaga et al.**, 2003). Por lo tanto, la novedad aquí documentada, representa el primer registro de la especie, tanto en Colombia como en Sudamérica. En Colombia, esta



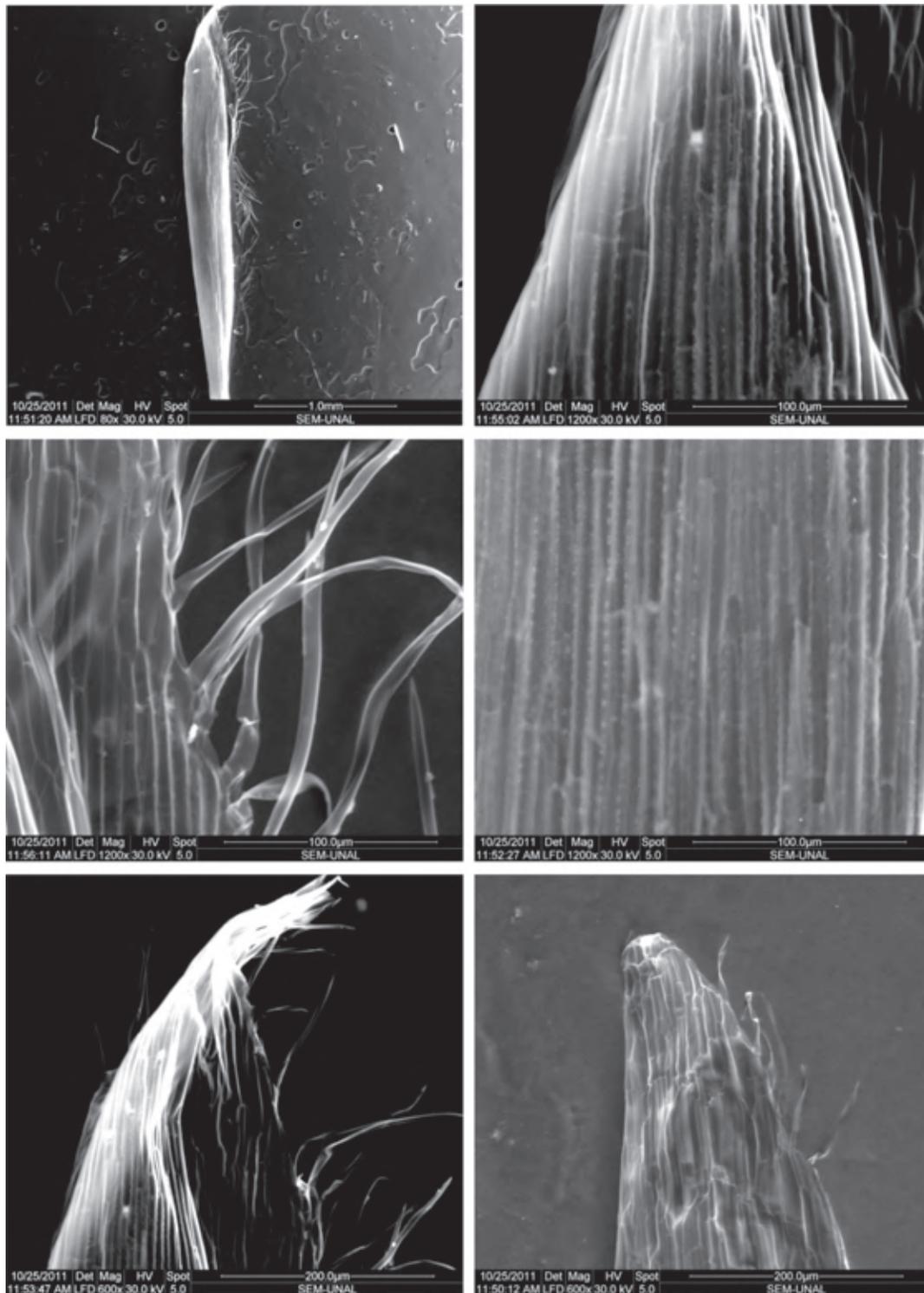
**Figura 2.** Características micromorfológicas de las espiguillas sésil y pediceladas de *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin. **A.** Espiguilla sésil con dos estigmas plumosos y callo piloso; **B.** Callo piloso; **C.** Porción distal de la espiguilla sésil y porción proximal de las espiguillas pediceladas; **D.** Detalle de la porción distal de la espiguilla sésil (del lado de la gluma inferior); **e.** Detalle de la porción medial marginal de la gluma inferior de la espiguilla sésil; **F.** Detalle de la porción proximal de una espiguilla pedicelada [todo de *C. Lastra-Romero et al.* 538 (COL)].



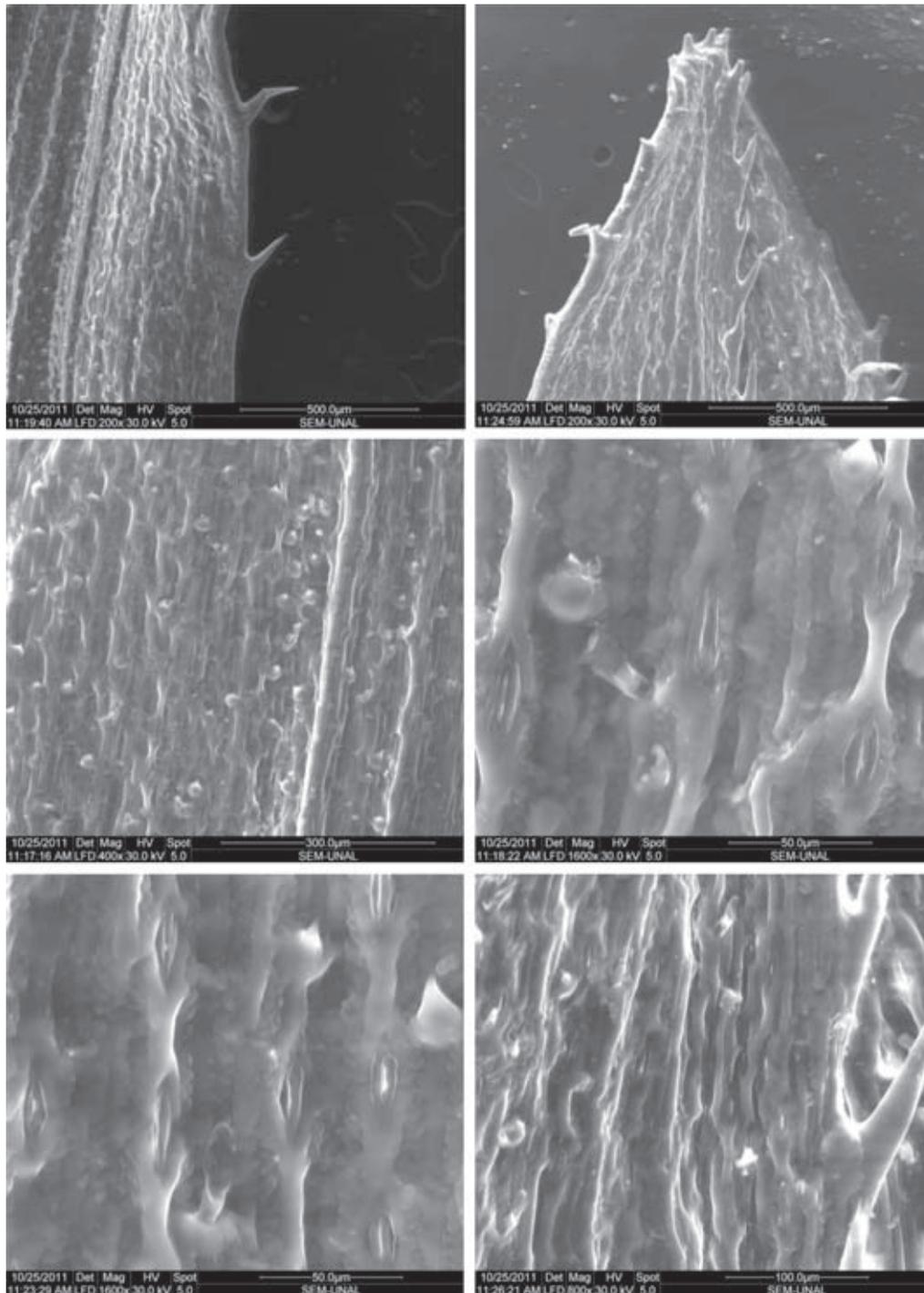
**Figura 3.** Características micromorfológicas de las espiguillas sésil y pediceladas de *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin. **A.** Porción distal de las espiguillas pediceladas. Nótese en el centro la arista de la lema superior de la espiguilla sésil; **B.** Detalle de **A**; **C.** Detalle de la inserción de una espiguilla pedicelada a su respectivo pedicelo; **D.** Detalle de la porción distal del pedicelo de una espiguilla pedicelada; **e.** Estigma de una espiguilla sésil; **F.** Anteras de una espiguilla pedicelada [todo de *C. Lastra-Romero et al. 538* (COL)].



**Figura 4.** Características micromorfológicas de las espiguillas sésil y pediceladas de *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin. **A.** Porción proximal de una espiguilla sésil (del lado de la gluma inferior); **B.** Detalle de **A**; **C.** Porción medial de la gluma inferior de una espiguilla sésil; **D.** Detalle de **C**; **e** y **F.** Porción medial de la gluma inferior de una espiguilla pedicelada. Nótese en A-D la distribución y la abundancia de los fitolitos halteriformes simples de centro corto y final convexo, y en B algunos fitolitos en cruz gruesa [todo de *C. Lastra-Romero et al. 538* (COL)].



**Figura 5.** Características micromorfológicas de las espiguillas pediceladas de *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin. **A.** Lema superior; **B.** Porción distal de la lema superior; **C.** Tricomas (cilios) unicelulares de la lema superior; **D.** Porción medial de la lema superior; **e.** Porción distal de la lema superior; **F.** Porción distal de la pálea superior [todo de *C. Lastra-Romero et al. 538* (COL)].



**Figura 6.** Características micromorfológicas de la lámina foliar de *Chrysopogon aciculatus* (Retz.) Trin. **A.** Asperezas marginales de la lámina foliar (superficie adaxial); **B.** Detalle de la porción distal (superficie abaxial); **C.** Detalle de la porción medial (superficie adaxial); **D.** Detalle de la porción medial (superficie adaxial) (nótese algunos aparatos estomáticos, un tricoma bicelular con la célula distal colapsada y un fitolito circular); **e.** Detalle de la porción medial (superficie abaxial) (nótese algunos aparatos estomáticos, dos asperezas y un tricoma bicelular con la célula distal colapsada); **F.** Detalle de la porción distal (superficie abaxial) (nótese dos asperezas en el nervio medio). Nótese en A, B y C algunas papilas simples, tanto en la superficie abaxial como en la adaxial; nótese en C la cantidad y la distribución de las asperezas; nótese en D y E las células largas con los bordes sinuosos [todo de C. Lastra-Romero et al. 538 (COL)].

especie constituye una vigorosa maleza en pastizales de *Urochloa* spp. de tierras bajas y húmedas (0-500 m de altitud), en el valle del Magdalena Medio en el departamento de Santander.

Con este hallazgo, el género *Chrysopogon* queda representado en Sudamérica por dos especies, *C. aciculatus* (introducida-naturalizada) y *C. zizanioides* (L.) Roberty [= *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash], esta especie en Sudamérica sólo se conoce por material cultivado, ya que es usada en perfumería. Por otra parte, esta novedad corológica incrementa el número de géneros y especies de gramíneas para Colombia a 177 y 890, respectivamente (**Giraldo-Cañas**, datos inéditos). Así, el número de gramíneas naturalizadas en Colombia asciende a 89 especies (**Giraldo-Cañas**, datos inéditos), una cifra que ya empieza a ser preocupante, toda vez que muchas de ellas son más agresivas en su crecimiento (como es el caso de *C. aciculatus*), lo que se traduce en desplazamientos de las especies nativas.

### e ejemplares examinados

COLOMBIA. **santander**: Puente Parra, "La M", Aguilinda, finca Hacienda El Brillante, 6°70'N - 73°95'O, 120 m, 4-7 abr 2011, *C. Lastra-Romero et al.* 538 (COL, HFAB).

PANAMÁ. **Panamá**: Ciudad de Panamá, vía Brasil, en un lote baldío, llegando a los cines Obarrio, 24 feb 1918, *D. Concepción & R. Isos* 73 (MO).

HAWAI. **Oahu**: Honolulu, in lawns on Kewalo St. between Wilder Ave. and Nehoa St., 6 dic 1947, *P. W. Weber s.n.* (COL: 149565).

### Agradecimientos

Al Instituto de Ciencias Naturales y a la Universidad Nacional de Colombia por las facilidades brindadas para la preparación de este trabajo. A los doctores Margarita Perea Dallos y Santiago Díaz Piedrahita por sus valiosos comentarios y correcciones, los cuales ayudaron a mejorar significativamente la versión inicial del manuscrito. Al Centro de Equipos Interfacultades "CEIF" (Universidad Nacional de Colombia) por su colaboración en el uso del microscopio electrónico de barrido. A Camilo Lastra Romero (HFAB) por el obsequio de los ejemplares botánicos. A Marcela Morales (COL) por la elaboración de la ilustración. Este artículo es una contribución derivada del proyecto "Estudios morfoló-

gicos, anatómicos y taxonómicos en gramíneas neotropicales", de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá D. C.

### Bibliografía

- Clayton, W. D. & s. A. Renvoize.** 1999. Genera Graminum: Grasses of the world. Kew Bull., Additional Series **13**: 1-389.
- Davidse, G.** 1994. *Chrysopogon* Trin. Flora Mesoamericana **6**: 383.
- Díaz Piedrahita, s.** 2002. Algunas notas relativas a la diversidad de la flora colombiana. Revista La Tadeo **67** (volumen especial "Biodiversidad una cuestión debida"): 39-46.
- ellis, R. P.** 1979. A procedure for standardizing comparative leaf anatomy in the Poaceae. II. The epidermis as seen in surface view. Bothalia **12**: 641-671.
- erra, G.** 2010. Asignación sistemática y paleocomunidades inferidas a partir del estudio fitolítico de sedimentos cuaternarios de Entre Ríos, Argentina. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica **45**: 309-319.
- Giraldo-Cañas, D.** 2011. Una nueva especie de *Arthropogon* (Poaceae: Panicoideae: Paniceae) y primer registro del género en Colombia. Caldasia **33**: 397-412.
- Giraldo-Cañas, D. & P. M. Peterson.** 2009. El género *Muhlenbergia* (Poaceae: Chloridoideae: Cynodonteae: Muhlenbergiinae) en Colombia. Caldasia **31**: 269-302.
- Groombridge, B. & M. D. Jenkins.** 2002. *World Atlas of Biodiversity. Earth's living resources in the 21st Century.* University of California Press, Berkeley.
- Häfliger, e. & H. scholz.** 1980. *Grass weeds 1. Weeds of the subfamily Panicoideae.* CIBA-GEIGY Ltd., Basle.
- Hitchcock, A. s.** 1922. The grasses of Hawaii. Memoirs of the Bernice Pauahi Bishop Museum **3**: 1-230.
- Madella, M., A. Alexandre & t. Ball.** 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. Annals of Botany **96**: 253-260.
- Metcalfe, C. R.** 1960. *Anatomy of the Monocotyledons. I. Gramineae.* Clarendon Press, Oxford.
- Palmer, P. G. & s. Gerbeth-Jones.** 1986. A scanning electron microscope survey of the epidermis of East African grasses. IV. Smithsonian Contributions to Botany **62**: 1-120.
- Palmer, P. G. & s. Gerbeth-Jones.** 1988. A scanning electron microscope survey of the epidermis of East African grasses. V. Smithsonian Contributions to Botany **67**: 1-157.
- Palmer, P. G. & A. e. t ucker.** 1981. A scanning electron microscope survey of the epidermis of East African grasses. I. Smithsonian Contributions to Botany **49**: 1-84.
- Palmer, P. G. & A. e. t ucker.** 1983. A scanning electron microscope survey of the epidermis of East African grasses. II. Smithsonian Contributions to Botany **53**: 1-72.
- Palmer, P. G., s. Gerbeth-Jones & s. Hutchison.** 1985. A scanning electron microscope survey of the epidermis of East African grasses. III. Smithsonian Contributions to Botany **55**: 1-136.
- Poilecot, P.** 1995. Les Poaceae de Côte-d'Ivoire. Manuel illustré d'identification des espèces. Boissiera **50**: 1-734.
- Quattrocchi, u.** 2006. *CRC World dictionary of grasses. Common names, scientific names, eponyms, synonyms, and etymology. Volumen I: A-D.* Taylor & Francis Group, Boca Ratón.

- Rangel-Ch., J. O.** 2006. La biodiversidad de Colombia. Palimpsesto **5**: 292–304.
- tzvelev, n. n.** 1999. Poaceae. En: N. N. Tzvelev & S. K. Czerepanov (eds.), Flora of Russia **1**: 117–511. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Veldkamp, J. F.** 1999. A revision of *Chrysopogon* Trin. including *Vetiveria* Bory (Poaceae) in Thailand and Malesia with notes on some other species from Africa and Australia. *Austrobaileya* **5**: 503–533.
- Zucol, A. F.** 1996. Microfitolitos de las Poaceae argentinas: I. Microfitolitos foliares de algunas especies del género *Stipa* (Stipeae: Arundinoideae) de la provincia de Entre Ríos. *Darwiniana* **34**: 151–172.
- Zuloaga, F. O., O. Morrone, G. Davidse, t. s. Filgueiras, P. M. Peterson, R. J. Soreng & e. J. Judziewicz.** 2003. Catalogue of New World grasses (Poaceae): III. Subfamilies Panicoideae, Aristoideae, Arundinoideae, and Danthonioideae. Contributions from the United States National Herbarium **46**: 1–662.

Recibido: Enero 16 de 2012.

Aceptado para publicación su publicación: Marzo 2 de 2012.

# ACOPLAMIENTO DE PLASMONES LOCALIZADOS EN NANOSISTEMAS

Angela s. Camacho B.\*

## Resumen

**Camacho B., A. s.:** Acoplamiento de plasmones localizados en nanosistemas. Rev. Acad. Colombi. Cienc. **36** (138): 15-24, 2012. ISSN 0370-3908.

Con el avance de la nanotecnología se han encontrado propiedades ópticas nuevas de sistemas físicos de tamaño nanométrico que permiten investigar las interacciones de la luz con nanopartículas. En este trabajo se presenta un estudio sistemático del acoplamiento de plasmones localizados en sistemas de dos partículas metálicas dependiendo de la forma, el tamaño y la distancia entre ellas. Observamos el enorme aumento del campo cercano que depende tanto de la creación del plasmón localizado como de la distribución de carga en las superficies y discutimos los diferentes conceptos físicos subyacentes al máximo factor de aumento y a la máxima frecuencia plasmónica.

**Palabras clave:** Resonancia de plasmones superficiales, nanopartículas metálicas, acoplamiento plasmónico.

## ABSTRACT

The rapid development of Nanotechnology has allowed finding new optical properties of nanosystems, which give rise to investigation of light-matter interactions at nanoscale. In this work we present a systematic study of surface-localized plasmons coupling in systems of two metallic nanoparticles following shape, size and distance between them. We observed the enormous enhancement of the near field, which is strongly dependent on the plasmon creation and the charge distribution at the surface. We also find out the plasmon frequency dependence on the above parameters and discuss the different physical concepts underlying the maximum near field and maximum frequency.

**Key words:** Superficial plasmon resonance, metallic nanoparticles, plasmonic coupling

---

\* Departamento de Física, Universidad de los Andes, Carrera 1 #18A-10, Bogotá, Colombia

## 1. Introducción

La plasmónica es un campo de la nano-fotónica que se ocupa principalmente de la manipulación de luz a nano-escala basada en las propiedades de plasmones superficiales localizados y propagantes. Plasmones son las oscilaciones colectivas del gas de electrones en un metal o un semiconductor. Las ondas ópticas pueden acoplarse a estas oscilaciones electrónicas en forma de ondas superficiales propagantes o excitaciones localizadas dependiendo de la geometría [1].

Este campo explota los plasmones para diseñar y manipular las propiedades resonantes de los plasmones a través de la geometría de estructuras metálicas. En teoría cuántica, un plasmón es una cuasi-partícula que resulta de la cuantización de oscilación de plasma electrónico interactuando con un fotón. A pesar de sus orígenes cuánticos, las propiedades de los plasmones se pueden describir rigurosamente por electrodinámica clásica. Los plasmones superficiales existen en todas las escalas y no están limitados a sistemas confinados. Así, para películas metálicas delgadas, por ejemplo, los plasmones superficiales son las ondas electromagnéticas que se propagan a lo largo de la interface metal-dieléctrico. Ellos pueden existir en cualquier interface y en el rango de frecuencia donde las constantes dieléctricas reales de los medios que constituyen la interface son de signo contrario. Pequeñas partículas de gases nobles, con dimensiones desde unos pocos hasta unos cientos de nanómetros, también soportan oscilaciones de plasmones superficiales que crean campos electromagnéticos muy grandes en las superficies de las nanopartículas. La frecuencia de resonancia del plasmón está determinada por la función dieléctrica que depende de la frecuencia del metal y la constante dieléctrica del medio que la rodea, además es fuertemente dependiente del tamaño y forma de la nano-estructura. Tanto la resonancia plasmónica para una película delgada como la resonancia plasmónica superficial localizada de una nano-partícula aislada han despertado gran interés en la comunidad científica, debido a la aplicación en dos grandes áreas: 1) Como sensores basados en la dependencia del índice de refracción de la resonancia plasmónica o la amplificación del campo óptico cercano a la nanoestructura y 2) la manipulación y guía de luz usando guías de onda plasmónicas. La amplificación del campo cercano se puede estudiar desde el punto de vista de aplicaciones en Raman scattering de moléculas y desde el punto de vista fundamental de acoplamiento entre nano-partículas para formar sistemas más complejos

o hibridización plasmónica en la cual se usa el modelo mesoscópico de orbitales moleculares.

En este trabajo abordamos el concepto de la hibridización en sistemas de dos nano-partículas metálicas a través del aumento del campo local y del estudio de la frecuencia de resonancia plasmónica y comparamos modelos teóricos simplificados con los resultados de una simulación que contiene toda la física del problema. Encontramos que el acoplamiento plasmónico elemental entre dos nanopartículas no se puede reducir a efectos lineales y que la formación de la nueva entidad que podemos llamar la molécula plasmónica tiene que ser explicada introduciendo en la teoría órdenes de aproximación no lineal. En la sección 2 presentamos una discusión del origen, descripción y aplicación del factor de aumento de campo cercano en sistemas de nanopartículas metálicas, en la sección 3 analizamos las limitaciones de los modelos más usados y en el numeral 4 mostramos los resultados de una simulación que permite comparar con las predicciones teóricas e interpretar a partir de nuestras observaciones los posibles procesos físicos que definen el acoplamiento plasmónico o hibridización. Finalmente en la sección 5 resumimos las conclusiones del estudio del proceso elemental de formación de un sistema más complejo, que podríamos llamar la molécula plasmónica.

## 2. el factor de aumento del campo cercano

El aumento del campo local se explica por dos procesos: aumento de la densidad de líneas de campo en puntas y esquinas y la excitación de plasmones superficiales localizados que es responsable de la amplificación de fluorescencia y generación de segundos armónicos en películas delgadas. Para nano-partículas metálicas ambos procesos contribuyen creando un campo cercano aumentado localizado. El caso de la amplificación de la señal Raman SERS (Surface Enhanced Raman Spectroscopy) es muy atractivo porque contiene información de la estructura molecular que se puede utilizar para identificación química. Este tópico despertó el interés de muchos grupos y se ha hecho un gran esfuerzo en desarrollar y optimizar sustratos SERS. Esta espectroscopia se descubrió en moléculas atadas a electrodos de plata rugosos que mostraron factores de aumento de campo hasta de  $10^6$  debidos a interacción molécula-metal. Se han logrado factores de aumento de  $10^{14}$  y por esto se han propuesto como nano-antenas que recogen y enfocan la luz incidente en la vecindad de las nano-partículas [2].

La habilidad de producir campos ópticos altamente confinados obliga a examinar de nuevo las reglas convencionales de interacción luz-materia y los regímenes nuevos de óptica física. Hasta ahora se han usado lentes dieléctricos y resonadores para lograr concentrar la luz. Siguiendo las leyes fundamentales de difracción los lentes dieléctricos no pueden enfocar luz en regiones menores a media longitud de onda de la luz y los resonadores dieléctricos tienen modos volumétricos limitados  $3/2$  de la longitud de onda de la luz en el dieléctrico. Las estructuras nano-metálicas no presentan estas limitaciones, entonces cuando se desea controlar a nivel de sublongitud de onda, se deben usar metales a nanoescala [3]. Actuando como una interface combinada con la nanoescala la estructura plasmónica puede cambiar las interacciones luz-materia a un nivel fundamental [4]. La posibilidad de frenar la luz dependiendo del medio en que se propaga es la base de esta novedad.

Cuando campos eléctricos variables con el tiempo ejercen fuerza sobre el gas electrónico dentro del metal lo impulsan en oscilaciones colectivas que se conocen como plasmones superficiales. A frecuencias ópticas específicas esta oscilación es resonante y produce un desplazamiento de carga muy fuerte y una concentración de campo asociada. La aproximación cuasi-estática es válida cuando el tamaño de la nano-estructura es mucho menor que la longitud de onda de la luz incidente en el espacio libre de tal manera que la estructura entera experimenta un campo uniforme en cualquier instante de tiempo. En este régimen los efectos resonantes se resuelven por el potencial electrostático para una estructura de constante dieléctrica y geometría dadas en un campo uniforme. Partículas esféricas muestran una resonancia plasmónica a longitudes de onda de resonancia donde  $\epsilon_m = -2 \epsilon_d$ , donde  $\epsilon_m$  y  $\epsilon_d$  son las permitividades de metal y dieléctrico respectivamente. Las frecuencias de resonancia cuasi-estática se pueden estudiar en un ancho rango de frecuencias cambiando el tipo de metal, el tamaño, la forma de la partícula y el ambiente dieléctrico [5].

Desde el punto de vista cuántico los plasmones son modos colectivos que se pueden expresar como superposiciones coherentes de excitaciones de pares electrón-hueco. En caso de una nanopartícula pequeña (de pocas moléculas), el modo plasmónico no se ha formado totalmente y la respuesta óptica se describe mejor en términos moleculares. Al hacerse más grande la partícula, la diferencia de energía entre los niveles electrónicos decrece y aparece el modo colectivo plasmónico. Una nanoesfera metálica debe contener al

menos 500 electrones para que se forme el plasmón. Cálculos mecano-cuánticos de las propiedades ópticas modelan la función dieléctrica incluyendo efectos locales y apantallamiento electrónico.

Para metales nobles la respuesta óptica está determinada por los plasmones, esto es, por los electrones de conducción. Suponiendo el líquido de electrones de conducción descrito por el modelo de Jellium donde el potencial confinante de la vecindad iónica se reemplaza por una caja de potencial constante. Si los parámetros de esta caja se escogen de tal manera que la nanopartícula tenga la función trabajo correcta, el perfil de densidad electrónica resultante es similar a la densidad electrónica del metal real. El modelo de Jellium ha sido muy exitoso y está definido por el parámetro de densidad electrónica de conducción, el cual es el radio de la esfera del material que contiene un electrón y la polarizabilidad de la red que lo rodea, la cual es la polarizabilidad efectiva de los iones.

Una comparación de aumentos de campo obtenidos por cálculos cuánticos y clásicos se encuentra que estos últimos sobreestiman el aumento de campo cercano a menos de 0,5 nm de distancia a la nanopartícula. Lo cual no sorprende ya que la densidad electrónica rebasa la superficie, y esto efectivamente apantalla los campos locales. Otro factor que contribuye es el aspecto no local del apantallamiento debido a electrones de la superficie. En un modelo clásico la carga superficial se supone en una región infinitamente delgada en la interface, mientras que en un cálculo realista las cargas apantalladas se distribuyen en una región finita alrededor de la superficie.

En nanopartículas metálicas las regiones interjuntura fueron calificadas de *hot spots*. Así se llegó a la descripción del efecto electromagnético de enfoque que no es un acoplamiento ni radiativo ni de largo rango y se debe, más bien, a un acoplamiento entre vecinos cercanos. En una combinación de Raman scattering en una partícula y AFM (Microscopio de Fuerza Atómica), se identificaron señales SERS brillantes resultantes de pares de nanopartículas adyacentes [6]

### 3. Modelos analíticos y sus limitaciones

Cálculos basados en Electrodinámica de un par de nanopartículas adyacentes de mismo material y geometría mostraron la intensidad de los *hot spots* y su dependencia de la polarización [7]. Estos estudios establecieron una propiedad nueva e importante de pares de nanopartículas, su habilidad de enfocar luz

vía excitación plasmónica muy por debajo del límite de difracción clásico a volúmenes de la magnitud de la junta interpartículas.

Adicionalmente se han propuesto teorías para dar una idea física intuitiva de los plasmones acoplados en nanoestructuras complejas. En el modelo de hibridización plasmónica, los modos plasmónicos se expresan en términos de interacciones entre las resonancias plasmónicas de las componentes elementales. Los modos plasmónicos hibridizados a partir de hibridización de funciones de onda atómicas individuales. [8]

El acoplamiento interpartícula induce corrimientos en la posición espectral de la resonancia del plasmón comparada con el caso de una partícula aislada (sin interacción).

Nuestro interés se enfoca en sistemas resonantes de tamaño mucho menor que la longitud de onda del campo aplicado (sub-longitud de onda).

Para comenzar el estudio de forma analítica, la geometría más conveniente es una esfera de radio  $a$ , homogénea e isotrópica localizada en el origen y en presencia de un campo eléctrico estático  $E=E_0$  en dirección  $z$

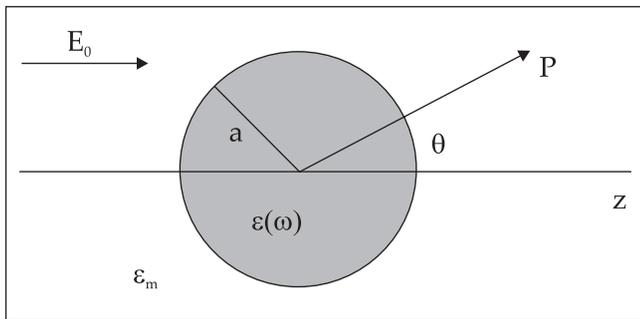


Figura 1. Esfera metálica homogénea en presencia de un campo eléctrico.

El medio que rodea la esfera es isotrópico y no absorbente con constante dieléctrica  $\epsilon_m$ . Las líneas de campo son generadas paralelas a la dirección  $z$ . La respuesta de la esfera al campo aplicado está descrita por la función dieléctrica  $\epsilon(\omega)$ , que será tomada por el momento como un número complejo. Primero se obtiene el potencial electrostático usando la ecuación de Laplace y de este se obtiene el campo eléctrico. El campo aplicado induce un momento dipolar  $p$  dentro de la esfera proporcional a la magnitud del campo  $E_0$ .

$$p = \epsilon\epsilon_0\alpha E_0 \tag{1}$$

donde  $\alpha$  es la polarizabilidad que es igual a

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{\epsilon - \epsilon_m}{\epsilon + 2\epsilon_m} \tag{2}$$

la cual muestra un máximo cuando el denominador se anula, esto es,

$$\text{Re}[\epsilon(\omega)] = -2 \epsilon_m \tag{3}$$

que se conoce como la condición de Froehlich

Los valores del campo eléctrico dentro y fuera de la esfera obtenidos del potencial son:

$$E_{in} = \frac{3\epsilon_m}{\epsilon + 2\epsilon_m} E_0 \tag{4}$$

$$E_{out} = E_0 + \frac{3n(n.p) - p}{4\pi\epsilon_0\epsilon_m r^3} \tag{5}$$

donde  $n$  es el vector unitario normal a la superficie. Bajo estas condiciones la nanopartícula se comporta como un dipolo eléctrico absorbiendo y dispersando campos eléctricos en una buena aproximación para partículas esféricas o cercanamente esféricas de tamaños del orden de 100 nm. En la teoría de Mie se expanden los campos en armónicos esféricos y luego se expanden en serie los coeficientes de absorción y dispersión y se trabaja solamente con el primer término. [9]

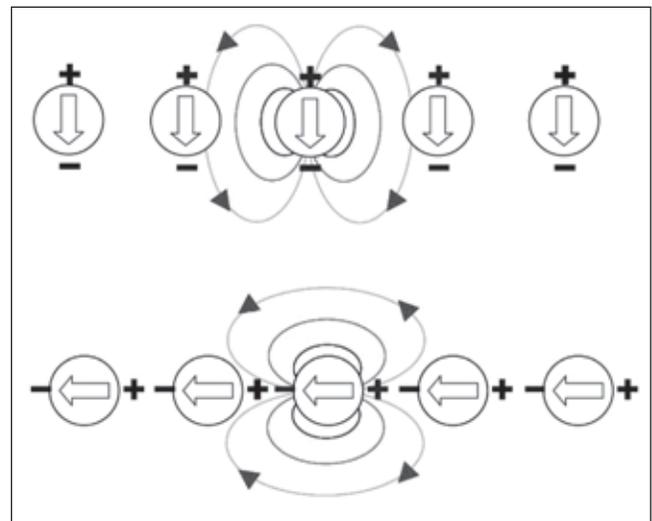


Figura 2. Esquema de campo dipolar cercano para nanopartículas metálicas sometidas a polarizaciones transversal (a) y polarización longitudinal (b).

La fuerza de restauración que actúa sobre los electrones oscilantes en cada una de las partículas de la cadena, tiene dos posibilidades: aumentar o disminuir

debido a la distribución de carga de las partículas vecinas. Dependiendo de la dirección de polarización de la luz incidente (luz de excitación), se puede generar corrimiento de la resonancia del plasmón.

Considerando solamente interacciones dipolares en arreglos de nanopartículas que son las más fuertes en una teoría lineal sabemos que las condiciones para que esta aproximación valga es que las dimensiones de las partículas sean menores que la distancia  $d$  entre ellas. Si  $d$  es mucho menor que la longitud de onda, el campo cercano varía como  $d^{-3}$  y el arreglo se puede describir como dipolos. El campo cercano se localiza entre las nano-partículas ya que la excitación de los modos plasmónicos suprime la dispersión de campo lejano.

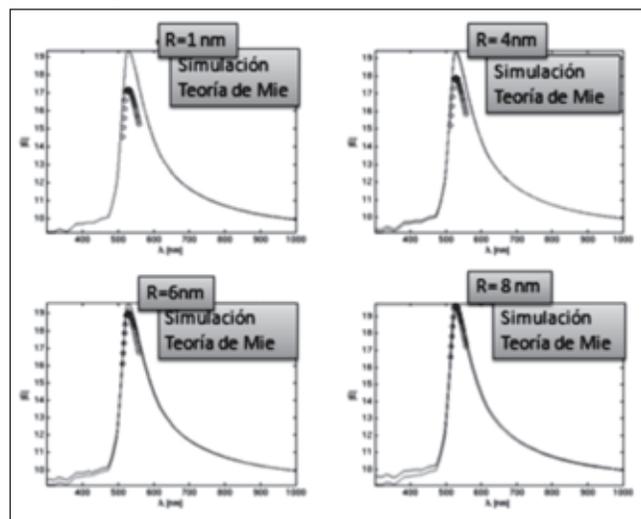
Para ir más allá de los modelos sencillos, como la teoría de Mie [9] y la aproximación dipolar, y comparar estos modelos con soluciones más completas que no se basan en expansiones en serie y suposiciones de términos mucho mayores que otros, presentamos en este reporte los resultados de la simulación de los sistemas de pocas nano-partículas metálicas.

#### 4. simulación

La simulación se llevó a cabo usando el paquete multi-physics COMSOL que soluciona sistemas de ecuaciones diferenciales por el método de elementos finitos. Para comprobar la confiabilidad del método calculamos la dependencia radial del campo eléctrico evaluado en el eje  $z$  usando la aproximación dipolar y comparamos con los resultados COMSOL para diferentes dimensiones de la malla. Encontramos que la dependencia radial del campo eléctrico evaluado en el eje  $z$ , calculado con aproximación dipolar coincide con la simulación COMSOL para varios enmallados propuestos por *Kappeler* [10]

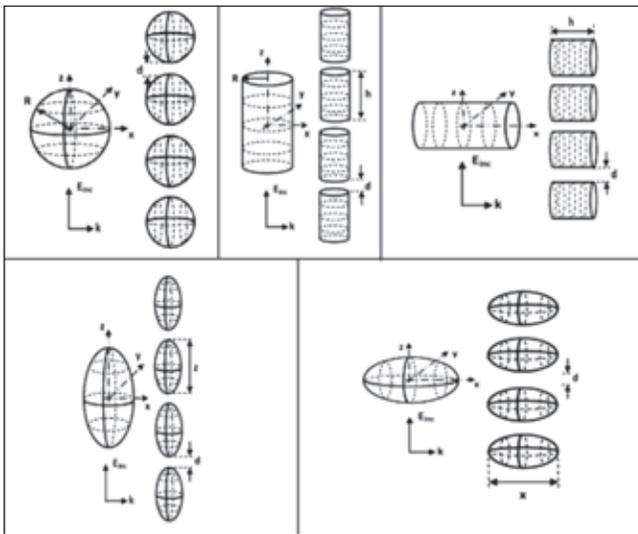
Para justificar el uso de COMSOL en el análisis de cadenas de nanopartículas metálicas, se puede hacer un comparativo con dos modelos teóricos: la aproximación dipolar y la teoría Mie. Todas las gráficas muestran el máximo valor de la norma del campo eléctrico en el eje  $z$ , y a la longitud de onda del campo aplicado. El campo eléctrico se genera en la superficie inferior de una nanopartícula esférica. Es claro que en este caso el máximo valor se presenta infinitesimalmente cerca de la superficie. Para los cálculos numéricos realizados por COMSOL, la máxima distancia alcanzable cerca de la superficie es de 0,1 nm [10].

Presentamos los resultados de la simulación y los modelos donde observamos que la simulación muestra valores mayores que los teóricos (Fig.3). Esto puede deberse a problemas con la resolución de la malla, como consecuencia del tamaño de la ventana computacional en comparación la esfera. Si se aumenta la malla del sistema a estudiar, es importante tener presente que los límites en la resolución de la malla están fijados por la ley de Shannon [11]. Los resultados anteriores reportados en [10], demuestran que el programa COMSOL es una buena herramienta para calcular campos eléctricos en la región interpartícula. Sin embargo, se puede ver claramente, que para esferas por debajo de 20 nm, la teoría Mie puede ser aplicada. La suposición, de que todas las nanopartículas responden como esferas es aceptable solo para partículas por debajo de 10 nm.



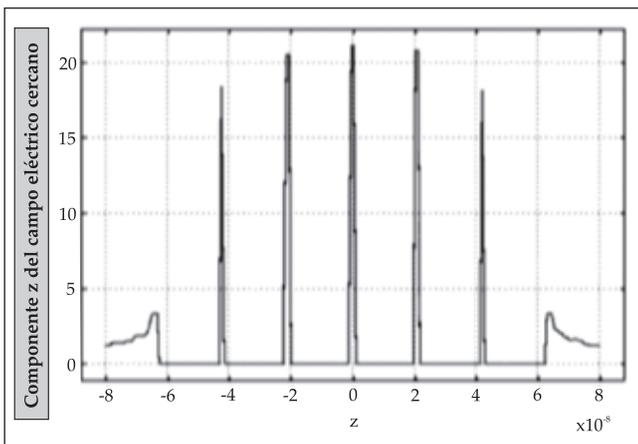
**Figura 3:** Espectro de esferas de diferentes radios en el régimen visible. Calculado con COMSOL (puntos), teoría de Mie (continua) y aproximación dipolar dan los mismos resultados. La simulación y las aproximaciones teóricas coinciden para esferas de radio mayor a 6 nm [10].

En la figura 4 mostramos los sistemas estudiados esferas, cilindros acoplados vertical y lateralmente, elipsoides acoplados vertical y lateralmente. Estos modelos nos permiten estudiar el efecto de aumento de campo en las regiones interpartícula variando su forma, tamaño y distribución para obtener información sobre el acoplamiento de dos de estas partículas. Hacemos incidir una onda electromagnética polarizada a lo largo del eje (eje  $z$ ) que une las dos partículas de oro de radio 10 nm para esferas y cilindros de 10 nm de radio altura de 10 nm y esferoides del mismo volumen y razón de aspecto 2:1.



**Figura 4.** Geometrías estudiadas a) esferas, b) cilindros acoplados verticalmente, c) cilindros acoplados lateralmente, d) elipsoides acoplados verticalmente e) elipsoides acoplados lateralmente.

Para iniciar la discusión de resultados presentamos en la figura 5 el perfil del campo cercano en una cadena de 6 esferas de oro de 25 nm de radio arregladas en una cadena lineal sobre la cual incide una onda electromagnética de longitud de onda de 560 nm polarizada en la dirección de la cadena (z) que se propaga en x. Observamos los picos de campo en las regiones interpartícula con un máximo en el centro de la cadena. En lo que sigue medimos el valor del campo en el centro del sistema, es decir en el centro del gap central. Si tomamos cadenas de 5 nanoesferas y variamos la



**Figura 5.** Perfil de campo cercano para 6 nanoesferas de oro de radio 25 nm cuando incide una onda electromagnética de 560 nm de longitud de onda polarizada a lo largo del arreglo.

distancia entre ellas notamos cómo el campo aumenta en varios órdenes de magnitud al disminuir la distancia de 5 nm a 1 nm. También encontramos un aumento cuando fijamos la distancia entre nanoesferas y variamos el radio de estas de 10 a 30 nm.

En cilindros observamos que el factor de aumento presenta un máximo para radios de 20 nm variando la distancia entre partículas y para los dos acoplamientos vertical y lateral. El máximo factor de aumento alcanza tres órdenes de magnitud para acoplamiento vertical debido a la distribución de campo más uniforme. La disminución del factor de aumento cuando aumenta la distancia entre partículas es exponencial mostrando una disminución en este factor de la mitad entre  $d=1\text{nm}$  y  $d=2\text{nm}$ . Todos estos resultados previos para cadenas de varias nanopartículas ya han sido reportados por nosotros [12].

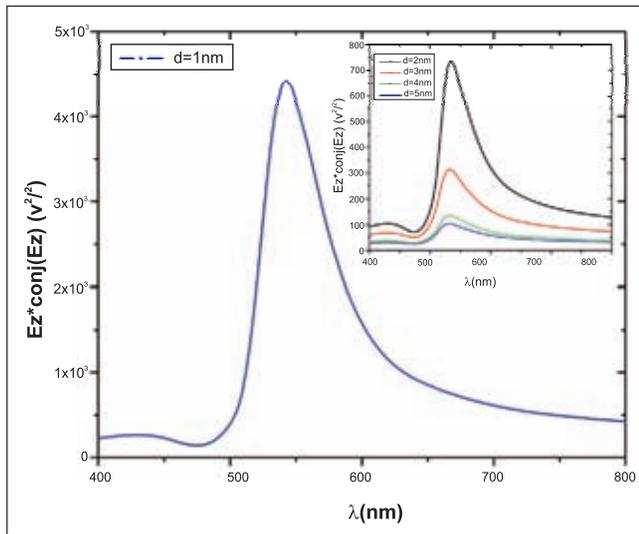
Se muestra la componente z del campo eléctrico cercano a lo largo del arreglo de 6 nanopartículas con máximos muy pronunciados en los gaps entre las partículas y un aumento aún mayor en el centro del sistema. Para analizar el sistema de dos partículas nos enfocamos en la medición del campo exactamente en el centro del gap.

### 4.1 Hibridización o acoplamiento

Mostramos en la figura 6 el comportamiento de la resonancia plasmónica en dos nanoesferas como función de la separación entre ellas. De nuevo observamos un gran aumento para  $d=1\text{nm}$  pero también un corrimiento al azul a medida que crece el gap entre las esferas. Esto es, el plasmón aumenta su energía cuando la separación aumenta aunque el campo cercano disminuye en intensidad. Esto sucede para polarización incidente paralela a la cadena, si la polarización es perpendicular la frecuencia del plasmón disminuye cuando aumenta el gap siguiendo un comportamiento dipolar.

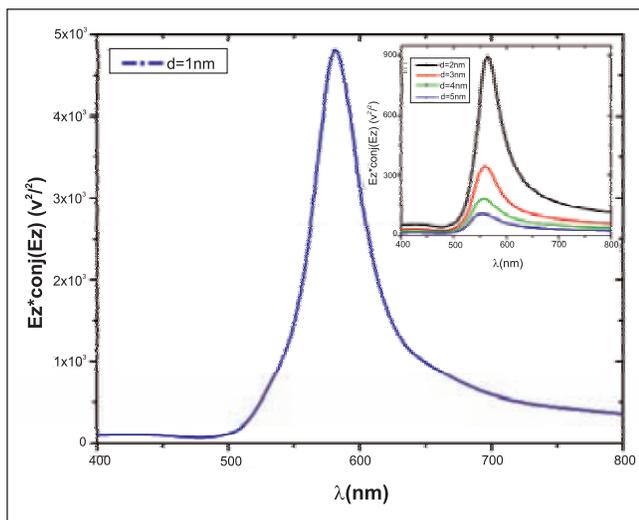
Se explica como una contribución creciente de modos cuadrupolares y más altos cuando decrece la separación y por lo tanto la energía tomada del campo es menor. Este efecto se ha detectado experimentalmente en el caso de nanocapas [15].

En la teoría del dímero plasmónico el modo dipolar  $l=1$  de cada nanopartícula se desdobra en dos modos colectivos: enlace y antienlace. Estos dos modos difieren en su acoplamiento a la luz: el modo de energía más bajo tiene los dipolos alineados longitudinalmen-



**Figura 6.** a) Factor de aumento de campo cercano como función de la longitud de onda del campo externo. Se observa la frecuencia de resonancia plasmónica para un dímero de esferas como función del gap entre ellas. b) Tabla de valores de distancia entre nanopartículas metálicas, longitud de onda, energía de resonancia y valor del campo en el centro del gap entre partículas.

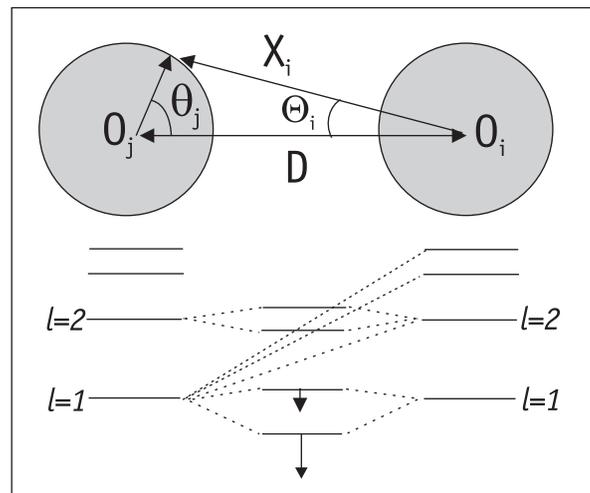
d(nm)	$\lambda$ (nm)	$E_r$ (eV)	$ E_z ^2$ (V <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
1	542,123	2.289	$4,40 \times 10^3$
2	535,010	2.319	$7,39 \times 10^2$
3	531,047	2.336	$3,13 \times 10^2$
4	530,046	2.341	$1,39 \times 10^2$
5	528.607	2.347	$1,02 \times 10^2$



d(nm)	$\lambda$ (nm)	$E_r$ (eV)	$ E_z ^2$ (V <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
1	581.385	2.134	$4,725 \times 10^3$
2	564.096	2.199	$8,98 \times 10^2$
3	559.220	2.219	$3,49 \times 10^2$
4	555.684	2.233	$1,86 \times 10^2$
5	553.246	2.243	$1,08 \times 10^2$

**Figura 7.** Frecuencia de resonancia plasmónica para un dímero de cilindros acoplados lateralmente como función del gap entre ellas. El corrimiento al azul se puede entender en términos de una mayor energía que es tomada del campo externo cuando los plasmones de los vecinos ya no hibridizan.

te dando como resultado un modo con un dipolo muy grande y un fuerte acoplamiento al campo lejano y así las propiedades ópticas del dímero están dominadas por el plasmón enlazante. Tales modos radiativos, modos que se acoplan al campo lejano se conocen como modos de plasmón brillante.



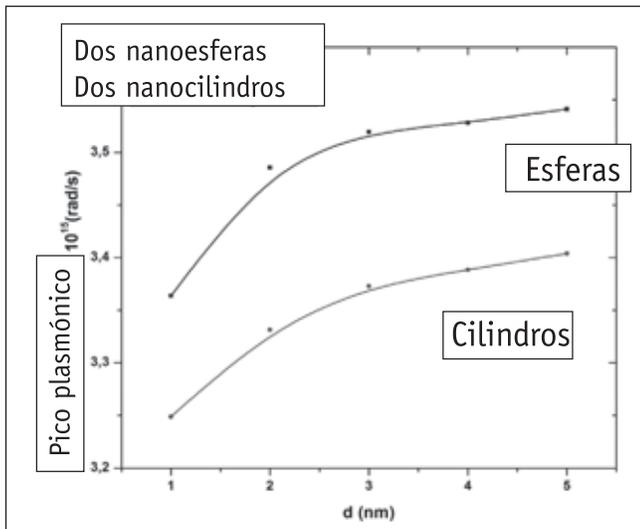
**Figura 8.** Hibridación plasmónica de un dímero. La cantidad  $X_j$  es la distancia entre el centro de la partícula  $N_j$  y un punto sobre la superficie de la partícula  $N_j$  de ángulo polar  $\theta_j$ . La cantidad  $\theta_j$  es el ángulo polar correspondiente en el sistema de coordenadas de  $N_j$  [13].

El modo dipolar colectivo  $l=1$  de energía más alta es el modo plasmónico antienlace y los dipolos de las partículas están antialineados resultando con dipolo neto cero y por lo tanto no se acoplan al campo lejano. Este es un modo de tipo cavidad u oscuro. En los hot spots detectados experimentalmente entre nano-partículas muy cercanas, a distancias menores a 1 nm y en nuestras simulaciones encontramos que

además de los modos dipolares se crean modos de orden más alto cuadrupolares, octupolares etc. y por lo tanto es necesario tener en cuenta efectos que se han despreciado por considerarlos pequeños. Los plasmones individuales de las dos nanopartículas interactúan y forman plasmones diméricos de enlace y antienlace anotando que la forma asintótica de interacción entre dos plasmones de esfera de momentum angular  $l$  y  $l'$  tiende a cero como  $D^{(l+l'+1)}$  [13,14].

En la geometría de esferas los plasmones de momentum angular dado interactúan con plasmones de diferente momentum angular de la otra partícula. Esta interacción induce corrimientos extra a separaciones pequeñas. La figura 8 muestra el corrimiento para plasmones diméricos derivados de momentum angular igual a uno ( $l=1$ )

El aumento del campo cercano en el gap es mayor que la suma de los aumentos de cada una de las partículas individuales indicando un acoplamiento entre las dos nanopartículas ya sean esféricas, cilíndricas o elipsoidales acopladas vertical o lateralmente.

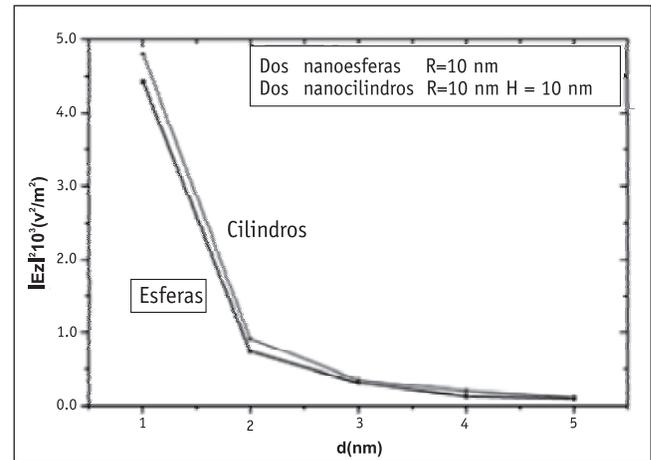


**Figura 9.** Frecuencia del pico plasmónico para dos esferas y dos cilindros como función de la separación entre ellos (gap).

Se observa que la frecuencia del pico plasmónico resonante aumenta con la distancia entre las nanopartículas aunque no lo hace de manera continua o monótona sino que muestra una tendencia a la saturación a partir de una distancia de 3 a 4 nm, lo cual se puede interpretar como un límite de la distancia a la cual se pierde el acoplamiento entre las dos partículas.

La frecuencia del plasmón aumenta a medida que se separan las dos nanopartículas porque la hibridación va disminuyendo dando paso a un comportamiento dipolar y por esa razón el factor de aumento de campo también disminuye. En todas las formas estudiadas observamos un decaimiento exponencial cuando el gap aumenta aunque las longitudes de decaimiento dependen de la forma geométrica, Este dato es importante en el entendimiento del acoplamiento plasmónico y su efecto en el aumento del campo cercano.

Cálculos teóricos de fuerzas ópticas de dipolos interpartícula para dos esferas metálicas predicen que la fuerza siempre es atractiva para un dímero iluminado en la configuración paralela y que los multipolos son muy importantes para interacciones atractivas a distancias muy pequeñas [13].



**Figura 10.** Comparación del decaimiento del factor de aumento de campo cercano para dos esferas y dos cilindros.

Nuestros resultados muestran que para nanopartículas muy cercanas separadas por aire con razones gap/tamaño de la partícula del orden de 0,1 la atracción de Coulomb entre cargas domina las oscilaciones o modo dimérico hibridado y el efecto resultante es el acoplamiento plasmónico, el cual difiere cualitativamente del acoplamiento dipolo-dipolo.

Para complementar nuestras conclusiones reportamos los valores de la longitud de onda de resonancia y el factor de aumento de campo para dos esferoides prolatos vertical y lateralmente acoplados. En el primer caso la longitud de onda de resonancia es de 556,82 nm y el factor de aumento de 4240 veces, mientras en acoplamiento lateral la resonancia está en 588,80 nm y el factor de aumento es de solo 1940 veces. Clara-

mente el mayor factor de aumento se obtiene para esferoides acoplados verticalmente dado que se suman los efectos de hibridización y el aumento del número de líneas de campo debido a la mayor curvatura.

Comparamos el factor de aumento de campo para sistemas de nano-partículas de diferentes tamaños y observamos que este factor crece cuando las nanopartículas son más grandes. En esferas aumenta 18 veces al duplicar el radio y en cilindros acoplados lateralmente solo aumenta tres veces cuando se duplica la longitud, lo que significa que el plasmón se delocaliza a lo largo de la superficie lateral.

#### 4.2 efectos del número de vecinos sobre el acoplamiento plasmónico

Cuando el número de nanopartículas crece observamos el mismo comportamiento del campo en el punto medio del sistema como en los dímeros. Sin embargo, para cuatro nano-cilindros acoplados lateralmente del mismo radio se logra un aumento de campo de un orden de magnitud, mientras para cuatro nanoesferas el aumento es de solamente 5 veces.

Los efectos de la forma de las nanopartículas sobre el factor de aumento se observan mejor en elipsoides prolatos con razón de aspecto 1:2 al colocarle a un dímero un nuevo vecino el campo aumenta  $5.8 \times 10^5$  veces. Comparando nanoelipsoides con cilindros o esferas el aumento es significativamente mayor para esferoides acoplados verticalmente. Esto se explica porque en los esferoides los dos efectos: el plasmón localizado y el efecto de punta se suman. Sin embargo el valor de la longitud de onda de resonancia se corre al rojo a medida que aumenta el número de vecinos indicando plasmones superficiales de menor energía.

En dímeros se detecta un corrimiento del pico plasmónico al azul cuando el gap aumenta. Los máximos de frecuencia se observan para tres partículas indicando que la hibridización es más fuerte en sistemas de tres partículas que en dos y el efecto del nuevo vecino es fortalecer el acoplamiento contribuyendo con nuevos efectos.

## 5. Conclusiones

La resonancia plasmónica está asociada con una variación muy grande de la intensidad de campo. Los dos efectos dependen muy fuertemente de la distancia entre partículas pero su comportamiento con la fre-

cuencia de la luz incidente permite analizarlos separadamente. El factor de aumento crece, como es de esperar, cuando la distancia entre partículas disminuye, mientras que la máxima frecuencia de plasmón resonante no coincide con el máximo del campo y más bien muestra el efecto contrario, es decir la frecuencia de resonancia aumenta al aumentar la distancia. Este corrimiento al azul no es monótono sino que satura, en nuestros ejemplos la saturación se observa a distancias del orden de 4 nm. Este comportamiento permite medir las distancias a las cuales el proceso de hibridización comienza. Podemos decir que la aproximación dipolar es válida a estas y mayores distancias. El factor de aumento de campo máximo da la señal de acoplamiento fuerte o hibridización mientras la posición en frecuencia de la resonancia plasmónica permite examinar la región de acoplamiento.

Presentamos la evolución de la magnitud del campo cercano para sistemas de dos partículas de oro, como función de gap inter-partícula, tamaño, forma y número de vecinas acopladas en un arreglo lineal cuando se iluminan con luz visible polarizada a lo largo del eje del arreglo. Esta polarización induce un campo muy fuerte en el centro del sistema, contrario al caso de la polarización transversal donde el máximo está en los extremos de las cadenas. Este hecho relaciona el aumento de campo con el proceso de hibridización. En cuanto a la forma encontramos, como era de esperar, que los esferoides muestran un factor de aumento mucho mayor que esferas y cilindros.

El factor de aumento es muy grande cuando las caras laterales vecinas muestran una mayor curvatura debido a la acumulación de carga. Por el contrario, cuando las caras son planas se detecta el límite de un condensador de placas paralelas con carga uniforme. Reportamos un factor de aumento del orden de cinco órdenes de magnitud para nanopartículas de oro de radio 10 nm. Finalmente, es de notar que la geometría que ofrece una mayor flexibilidad para sintonizar el pico plasmónico es la cilíndrica con acoplamiento lateral. Esta información es muy importante para fabricar sustratos SERS.

## Bibliografía

- [1] Surbhi Lal, Stephan Link, and Naomi J. Halas, 2007, Nano-optics from sensing to waveguiding, *Nature Photonics*, **1**, 641
- [2] Kathryn M. Maye and Jason H. Hafner, 2011, Localized Surface Plasmon Resonance Sensors, *Chemical Reviews*, **111**, 3828
- [3] Dmitri K. Gramotnev and Sergey I. Bozhevolnyi, 2010, Plasmonics beyond the diffraction limit, *Nature Photonics*, **4**, 83.

- [4] Jon A. Schuller, Edward s. Barnard, Wenshan Cai, Young Chul Jun, Justin S. White and Mark L. Brongersma, 2010, *Nature Materials* **9**,193
- [5] Naomi J. Halas, Surbhi Lal, Wei-Shun Chang, Stephan Link, and Peter Nordlander, 2011, Plasmons in Strongly Coupled Metallic Nanostructures, *Chemical Reviews*,**11**,3913
- [6] Talley, C. E.; Jackson, J. B.; Oubre, C.; Grady, N. K.; Hollars, C. W.; Lane, S. M.; Huser, T. R.; Nordlander, P.; Halas,N. J. , 2005,*Nano Lett.* **5**, 1569.
- [7] K.-H. Su, Q.-H. Wei, and X. Zhang, Interparticle Coupling Effects on Plasmon Resonances of Nanogold Particles, 2003,*Nano Letters* **3**,1087
- [8] Liu, H.; Liu, Y. M.; Li, T.; Wang, S. M.; Zhu, S. N.; Zhang, X., 2009, *Phys. Status Solidi B* **246**, 1397.
- [9] Mie, Gustav. Beitrage zur Optik ueber Medien, speziell kolloidaler Metalloesungen", 1908, *Ann. Phys.*, **25**,377.
- [10] R. Kappeler, 2006, Engineering the Field Enhancement at the apex of a Structured Noble Metal Tip. Diplomathesis, Communication Photonics Group, ETH Zurich.
- [11] D. Pines,1956, Collective energy losses in solids, *Rev. Mod. Phys.* **28**, 184
- [12] J.C Arias and A. Camacho, 2011, surface plasmon resonance of a few particles linear arrays, *J.Electromagn.Analysis and Appl.* (aceptada)
- [13] Vladimir D. Miljkovic', Tavakol Pakizeh,Borja Sepulveda,| Peter Johansson, and Mikael Ka'l, 2010,Optical Forces in Plasmonic Nanoparticle Dimers *J. Phys. Chem. C* **114**, 7472
- [14] P. Nordlander and C. Oubre, E. Prodan and K. Li and M. I. Stockman, Plasmon Hybridization in Nanoparticle Dimers, 2004, *Nano Letters*, **4** ,899
- [15] Chad E. Talley, Joseph B. Jackson, Chris Oubre, Nathaniel K. Grady, Christopher Hollars, Stephen M. Lane, Thomas R. Huser, Peter Nordlander, Naomi. J. Halas, 2005, Surface-Enhanced Ramann Scattering from Individual Au Nanoparticles and Nanoparticle Dimer Substrates, *Nano Lett.* **5**, 1569.

Recibido: Octubre 10 de 2011.

Aceptado para su publicación: Marzo 2 de 2012.

# IDENTIFICANDO EL INFLATÓN CON EL BOSÓN DE HIGGS DEL MODELO ESTÁNDAR

César D. Peralta<sup>1</sup>, Yeinzon Rodríguez<sup>2,3</sup>

## Resumen

**Peralta, C. D.; Y. Rodríguez:** Identificando el Inflatón con el Bosón de Higgs del Modelo Estándar. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (138): 25-36, 2012. ISSN 0370-3908.

En este artículo, se estudia la posibilidad de que el bosón de Higgs del Modelo Estándar de Partículas Elementales pueda generar inflación primordial del tipo *rodadura lenta*, lo que resolvería los problemas clásicos de la cosmología estándar. El requisito crucial para hacer viable esta posibilidad, es que el campo escalar de Higgs presente un tipo particular de acoplamiento no mínimo a la gravedad. Se realiza una transformación conforme desde el marco de Jordan al marco de Einstein encontrándose una modificación al tradicional potencial de Higgs para valores muy grandes del campo, lo que permite una zona de alta planitud y, por ende, inflación primordial del tipo rodadura lenta. Se comparan los resultados asociados al índice espectral y a la razón tensor a escalar con las cotas observacionales más recientes, encontrándose que la generación de estructuras a gran escala en este escenario es satisfactoria.

**Palabras clave:** Inflación, bosón de Higgs, acoplamiento no mínimo a la gravedad.

## ABSTRACT

Particles can generate primordial inflation of the slow-roll variety, which solves the classical problems of the standard cosmology. The crucial requirement, for this possibility to be feasible, is that the scalar Higgs field is, in a particular way, non-minimally coupled to gravity. A conformal transformation is performed from the Jordan's frame to the Einstein's frame so that a modification on the traditional Higgs potential is found for very large values of the field; this allows a high flatness zone and, therefore,

- 
- 1 Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Ciudad Universitaria, Bucaramanga 680002, Colombia, E-mail: cesardany12@yahoo.com.mx
  - 2 Centro de Investigaciones en Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Antonio Nariño, Cra 3 Este # 47A -15, Bogotá, D.C. 110231, Colombia, E-mail: yeinzon.rodriguez@uan.edu.co
  - 3 Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Ciudad Universitaria, Bucaramanga 680002, Colombia, E-mail: yrodrig@uis.edu.co

primordial inflation of the rodadura lenta variety. The results associated to the spectral index and the tensor to scalar ratio are compared against the most recent observational bounds; from the latter, we conclude that the generation of the large-scale structure is successful in this scenario.

**Key words:** Inflation, Higgs boson, non-minimal coupling to gravity.

## 1. Introducción

La inflación primordial (**Guth**, 1981; **Linde**, 1982) se define como una fase inicial del Universo con expansión acelerada (cuasiexponencial) que permite explicar de forma natural la casi uniforme temperatura observada en la Radiación Cosmica de Fondo (RCF) (**Penzias & Wilson**, 1965) y la, también observada (**Komatsu et al.**, 2011), planitud del Universo. Adicionalmente, este período predice un espectro casi invariante con respecto a la escala, asociado a las perturbaciones en la densidad de energía que son vitales para la generación de las estructuras a gran escala en el Universo (**Guth & Pi**, 1982; **Lyth & Liddle**, 2009; **Rodríguez**, 2009), y perturbaciones tensoriales (**starobinsky**, 1979) asociadas a la generación de ondas gravitacionales. Las perturbaciones en la densidad de energía fueron confirmadas por la observación de las anisotropías en la temperatura de la RCF, llevadas a cabo inicialmente por el satélite COBE en 1992 (**smoot et al.**, 1992) y luego por el satélite WMAP en 2003 (**Bennett et al.**, 2003). Los modelos más simples para generar inflación proponen la introducción de un campo escalar primordial denominado el Inflatón (**Dodelson**, 2003; **Lyth & Liddle**, 2009; **Mukhanov**, 2005; **Weinberg**, 2008). Un requisito importante para la adecuada implementación del mecanismo inflacionario (**Linde**, 1982) es que el potencial del inflatón debe poseer una región lo suficientemente plana durante inflación conocida como la región de rodadura lenta (**Dodelson**, 2003; **Lyth & Liddle**, 2009; **Mukhanov**, 2005; **Weinberg**, 2008).

Los primeros intentos para modelar inflación, motivados por la fenomenología de partículas elementales (**Griffiths**, 2008; **Kane**, 1993; **nakamura et al.**, 2010; **'t Hooft**, 1980), consistieron en el uso del campo escalar de Higgs, acoplado de forma mínima a la gravedad, como candidato natural para el inflatón. El Lagrangiano total en este caso viene dado por

$$\mathcal{L}_{tot} = \mathcal{L}_{ME} - \frac{M_P^2}{2} R, \quad (1)$$

en donde  $M_P$  es la masa reducida de Planck,  $R$  es el escalar de Ricci (**Weinberg**, 1972), y  $\mathcal{L}_{ME}$  es el Lagran-

giano correspondiente al Modelo Estándar de Partículas Elementales (ME) (**Kane**, 1993) que contiene el Lagrangiano  $\mathcal{L}_H$  asociado al doblete escalar de Higgs  $H$ :

$$\mathcal{L}_{ME} \supset \mathcal{L}_H = -D_\mu H^\dagger D^\mu H + \mu^2 H^\dagger H - \lambda (H^\dagger H)^2, \quad (2)$$

siendo  $D_\mu$  la derivada covariante ante transformaciones de gauge asociadas al grupo de simetrías  $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  (**Kane**, 1993),  $\mu$  un parámetro de masa tal que  $\mu^2 > 0$ ,  $\lambda$  una constante de autoacoplamiento, y

$$H = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Sin embargo, para generar el período inflacionario requerido, es necesario asumir en este modelo una constante de auto-acoplamiento  $\lambda \simeq 10^{-13}$  (**Linde**, 1983), siendo ésta muy pequeña en comparación con la esperada a partir de la cota mínima obtenida por el LHC y el LEP del CERN para la masa del bosón de Higgs (**Abbiendi et al.**, 2003; **Atlas Collaboration**, 2012). Por otro lado, este modelo deriva en resultados desfavorables desde el punto de vista post-inflacionario en cuanto a la adecuada generación del proceso de recalentamiento (**Allahverdi, Brandenberger, Cyr-Racine, & Mazumdar**, 2010). Actualmente, esta posibilidad se encuentra descartada por las observaciones de la RCF (**Komatsu et al.**, 2011).

Hacia comienzos de los años 80's se observa que el problema del pequeño valor de  $\lambda$  puede ser evitado reemplazando el segundo término en el Lagrangiano total (c.f. Ec. (1)) por un término de acoplamiento no mínimo a la gravedad de la forma  $\xi H^\dagger H R$  (**spokoiny**, 1984; **Zee**, 1979):

$$\mathcal{L}_{tot} = \mathcal{L}_{ME} - \xi H^\dagger H R. \quad (4)$$

De esta manera, se relaja el ajuste fino sobre  $\lambda$ , y se da origen al término  $-\frac{M_P^2}{2} R$  en el Lagrangiano total efectivo a través del valor esperado en el vacío del campo de Higgs. Dicho procedimiento de generación dinámica de la masa reducida de Planck (la cual determina la fortaleza de la interacción gravitacional) se denomina el mecanismo de gravedad inducida. Desafortunadamente, este mecanismo conlleva a una física de par-

tículas incoherente con los resultados experimentales (**Cervantes-Cota & Dehnen**, 1995; **van der Bij**, 1994; **van der Bij**, 1995).

Trabajos recientes señalan que el bosón de Higgs del ME podría ser satisfactoriamente identificado con el inflatón siempre y cuando éste se encuentre acoplado de forma no mínima a la gravedad (**Barbinsky, Kamenshchik, & sta-robinsky**, 2008; **Bezrukov**, 2008; **Bezrukov, Magnin, & shaposhnikov**, 2009; **Bezrukov & shaposhnikov**, 2008). Así, no se requerirían extensiones del ME para dar cuenta de un período inflacionario primordial con perturbaciones cosmológicas en concordancia con la estadística de las anisotropías en la temperatura de la RCF. Estos trabajos demuestran que los valores obtenidos para parámetros tales como el índice espectral  $n_s$  y la razón tensor a escalar  $r$  caen dentro del contorno de 68% de nivel de confianza ( $1\sigma$ ) correspondiente a las observaciones más recientes del satélite WMAP (**Komatsu et al.**, 2011).

La idea principal es considerar el Lagrangiano total en donde el bosón de Higgs se encuentra acoplado de forma no mínima a la gravedad de acuerdo a:

$$\mathcal{L}_{tot} = \mathcal{L}_{ME} - \frac{M^2}{2}R - \xi H^\dagger H R, \quad (5)$$

en donde  $\mathcal{L}_{ME}$  es el lagrangiano correspondiente al ME,  $M$  es algún parámetro de masa,  $R$  es el escalar de Ricci,  $H$  es el doblete de Higgs, y  $\xi$  es una constante de acoplamiento. Si  $\xi=0$ , se dice que el acoplamiento del campo de Higgs a la gravedad es “mínimo”; así,  $M$  es identificado con la masa reducida de Planck  $M_p$  la cual se encuentra relacionada con la constante de gravitación universal  $G$  de la forma  $M_p \equiv (8\pi G)^{-1/2} = 2,436 \times 10^{18}$  GeV. El escenario con  $\xi = 0$  conduce a buenos resultados fenomenológicos en física de partículas, pero no reproduce inflación del tipo rodadura lenta. Por otra parte, si se asume que  $M=0$ , considerando de este modo gravedad inducida (**spokoiny**, 1984; **Zee**, 1979), el período inflacionario primordial del tipo rodadura lenta se presenta si  $\xi \sim (M_p/M_W)^2 \sim 10^{32}$  en donde  $M_W \sim 100$  GeV es la escala electrodébil. Dicho escenario, sin embargo, falla en la descripción de la fenomenología de partículas observada (**Cervantes-Cota & Dehnen**, 1995; **van der Bij**, 1994; **van der Bij**, 1995). Estos argumentos indican que puede existir una elección intermedia de  $M$  y  $\xi$  que se ajuste adecuadamente a inflación del tipo rodadura lenta y a física de partículas al mismo tiempo. De hecho, si se escoge  $M = M_p$  y se hace el parámetro  $\xi$  lo suficientemente pequeño,  $\xi \lll 10^{32}$ , es decir, muy lejos

del régimen de gravedad inducida, entonces el límite de bajas energías de la teoría descrita por el Lagrangiano en la Ec. (5) es justamente el ME con el bosón de Higgs usual. Ahora bien, si a su vez  $\xi$  es lo suficientemente grande,  $\xi \gg 1$ , el comportamiento del potencial escalar, relevante para el escenario inflacionario, cambia drásticamente y es posible obtener inflación del tipo rodadura lenta satisfactoriamente.

Cabe destacar que hasta la fecha no ha sido detectado el bosón de Higgs. La dificultad más grande del ME radica en no poder predecir su masa. Los últimos experimentos realizados en el CERN por el detector ATLAS del LHC muestran por escaneo directo que la masa del Higgs debe estar por encima de 115.5 GeV con un 95% de nivel de confianza (**At LAs Collaboration**, 2012) (teniendo en cuenta también los resultados obtenidos por el LEP del CERN (**Abbiendi et al.**, 2003)). Por otra parte, el detector CMS del CERN ha mostrado que el rango de masas de 127 a 600 GeV se encuentra excluido con un 95% de nivel de confianza (**CMs Collaboration**, 2012). Adicionalmente, los tests de precisión de la teoría electrodébil indican que la cota máxima para la masa del bosón de Higgs es de 158 GeV (**ALePH Collaboration et al.**, 2010). Finalmente es de anotar que, de forma muy interesante, se presenta un exceso de eventos en ATLAS y CMS sobre el fondo esperado del ME para una masa del bosón de Higgs de 126 GeV, de acuerdo a ATLAS, siendo estadísticamente significativo a  $3.5\sigma$  (**At LAs Collaboration**, 2012), y para una masa de 124 GeV, de acuerdo a CMS, siendo estadísticamente significativo a  $3.1\sigma$  (**CMs Collaboration**, 2012). Se requiere un mayor número de datos para aclarar el origen de estos excesos y, por ende, para anunciar, si es el caso, el descubrimiento del bosón de Higgs.

Esencialmente el artículo se organiza como sigue: en la Sección 2, se estudia la posibilidad de obtener inflación del tipo rodadura lenta mediante el campo escalar de Higgs acoplado de forma mínima a la gravedad. En la Sección 3, se presenta la acción efectiva, en el marco de Jordan (**Wald**, 1984), para el escenario en donde el bosón de Higgs se encuentra acoplado de forma no mínima a la gravedad; posteriormente se realiza una transformación conforme del marco de Jordan al marco de Einstein (**Wald**, 1984) para así obtener la forma del potencial requerido en una configuración en donde el acoplamiento a la gravedad es mínimo. En la Sección 4, se analiza la viabilidad de un período inflacionario primordial del tipo rodadura lenta; se calculan los parámetros cosmológicos y se comparan con las

cotas observacionales más recientes. Finalmente, en la Sección 5, se presentan las conclusiones.

## 2. el Campo escalar de Higgs acoplado de forma mínima a la gravedad

El potencial para el campo escalar de Higgs presenta tres regiones en donde, eventualmente, se podría generar inflación del tipo rodadura lenta. Para determinar la viabilidad de inflación de este tipo en cada una de estas regiones, se calcularán los respectivos parámetros de rodadura lenta y se observará si las condiciones respectivas (**Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008**) se satisfacen.

Primero que todo se define el doblete escalar de Higgs en el gauge unitario de la forma

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \phi \end{pmatrix}. \tag{6}$$

El potencial escalar, cuando el bosón de Higgs se encuentra acoplado de forma mínima a la gravedad, adquiere entonces la forma (**Kane, 1993**):

$$V(\phi) = -\frac{1}{2}\mu^2\phi^2 + \frac{1}{4}\lambda\phi^4, \tag{7}$$

a partir del cual se obtiene el valor de  $\phi$  para el mínimo de  $V(\phi)$ :

$$\phi = \sqrt{\frac{\mu^2}{\lambda}} \equiv v. \tag{8}$$

Ahora, el valor del potencial para  $\phi = v$  es

$$\begin{aligned} V(\phi = v) &= -\frac{1}{4}\frac{\mu^4}{\lambda} \\ &= -V_0. \end{aligned} \tag{9}$$

Así, se redefine el potencial reescalándolo de manera que su mínimo corresponda a  $V=0$  (véase la Figura 1)<sup>4</sup>:

$$V(\phi) = V_0 - \frac{1}{2}\mu^2\phi^2 + \frac{1}{4}\lambda\phi^4. \tag{10}$$

En este potencial se pueden considerar tres regiones en donde, eventualmente, se podría generar inflación del tipo rodadura lenta, las cuales vienen definidas por el valor relativo del campo escalar  $\phi$  con respecto a su valor esperado en el vacío  $v$ .

$$\begin{aligned} \phi &\ll v, \\ \phi &\simeq v, \\ \phi &\gg v. \end{aligned} \tag{11}$$

En la primera región  $\phi \sim 0$ ; en consecuencia el último término del potencial en la Ec. (10) se desprecia por tender a cero más rápidamente que los primeros dos términos. De esta manera, el potencial se puede describir con una muy buena aproximación como:

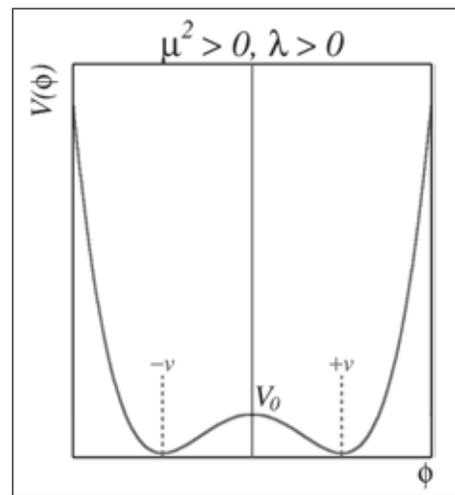
$$V(\phi) \simeq V_0 - \frac{1}{2}\mu^2\phi^2. \tag{12}$$

Los parámetros de rodadura lenta (**Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008**) son en esta aproximación:

$$\epsilon = \frac{M_P^2}{2} \left( \frac{V'(\phi)}{V(\phi)} \right)^2 \simeq \frac{8M_P^2\phi^2}{v^4}, \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \eta &= M_P^2 \frac{V''(\phi)}{V(\phi)} \simeq -\frac{4M_P^2}{v^2} \\ &= -\frac{4 \cdot (2,436 \times 10^{18})^2}{(246)^2} \simeq -3,92 \times 10^{32}, \end{aligned} \tag{14}$$

en donde una prima denota una derivada con respecto al campo escalar  $\phi$ , y se ha usado  $v \simeq 246$  GeV de acuerdo a los resultados experimentales concernientes al decaimiento beta del neutrón (**nakamura et al., 2010**). Las condiciones de rodadura lenta exigen que tanto  $|\eta|$  como  $\epsilon$  sean  $\ll 1$ . Para esta primera región del potencial, se observa que  $|\eta|$  presenta un valor mu-



**Figura 1:** Potencial asociado al campo escalar de Higgs en una dimensión cuando éste se encuentra acoplado de forma mínima a la gravedad. Este potencial se ha reescalado de tal manera que sus mínimos estables corresponden a  $V = 0$  y su máximo inestable corresponde a  $V = V_0$ .

4 Lo anterior con el fin de hacer este modelo coherente con la pequeña contribución a la densidad de energía proveniente de la constante cosmológica (**Weinberg, 2008**).

cho mayor que 1. Por lo tanto es imposible generar inflación.

En la segunda región  $\phi \simeq v$ , y por lo tanto todos los términos del potencial en la Ec. (10) son igualmente importantes. Así, los parámetros de rodadura lenta vienen dados por:

$$\epsilon \simeq \frac{M_P^2}{2} \left( \frac{-\mu^2\phi + \lambda\phi^3}{V_0 - \frac{1}{2}\mu^2\phi^2 + \frac{1}{4}\lambda\phi^4} \right)^2, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &\approx \frac{2M_P^2}{(\phi - v)^2}, \\ \eta &\simeq M_P^2 \left( \frac{-\mu^2 + 3\lambda\phi^2}{V_0 - \frac{1}{2}\mu^2\phi^2 + \frac{1}{4}\lambda\phi^4} \right), \quad (16) \\ &\approx \frac{2M_P^2}{(\phi - v)^2}. \end{aligned}$$

Dado que para esta región el valor del potencial es prácticamente igual a cero (ya que el campo escalar se encuentra alrededor de su valor esperado en el vacío), y teniendo en cuenta las expresiones (15) y (16), se puede observar que tanto  $\epsilon$  como  $|\eta|$  divergen, haciendo que la inflación del tipo rodadura lenta sea imposible en esta región.

Finalmente, en la tercera región  $\phi \gg v$ , con lo cual el último término en el potencial de la Ec. (10) es el dominante:

$$V(\phi) \simeq \frac{1}{4}\lambda\phi^4. \quad (17)$$

Procediendo de igual manera que en los dos casos anteriores, los parámetros de rodadura lenta vienen dados por (Linde, 1983).

$$\epsilon \simeq \frac{8M_P^2}{\phi^2}, \quad (18)$$

$$\eta \simeq \frac{12M_P^2}{\phi^2}, \quad (19)$$

de lo que se concluye que, en este caso, inflación del tipo rodadura lenta es viable en tanto se satisfaga la condición  $\phi^2 \gg 12M_P^2$ .

El valor del campo escalar al final de inflación,  $\phi_{\text{end}}$ , se determina a partir de la violación de las condiciones de rodadura lenta, es decir,

$$\phi_{\text{end}}^2 \simeq 12M_P^2. \quad (20)$$

Así, y empleando la expresión

$$N(\phi_*) = \frac{1}{M_P^2} \int_{\phi_{\text{end}}}^{\phi_*} \frac{V(\phi)}{V'(\phi)} d\phi, \quad (21)$$

que cuantifica el monto de inflación desde que el campo escalar  $\phi$  tiene un valor  $\phi^*$  hasta el final de inflación cuando  $\phi = \phi_{\text{end}}$  (Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008), se obtiene

$$\phi_*^2 \simeq 4M_P^2(2N(\phi_*) + 3). \quad (22)$$

De esta manera, y con el fin de comparar  $\epsilon$  y  $\eta$  con las observaciones sobre estructura a gran escala, se deben calcular estos parámetros en el tiempo  $t^*$  (correspondiente a  $N(\phi_*) \simeq 60$  (Lyth & Liddle, 2009) en el cual el Universo sale del horizonte. Insertando entonces la expresión dada en la Ec. (22) en las Ecs. (18) y (19) se obtiene

$$\epsilon(t_*) \simeq \frac{2}{2N(\phi_*) + 3} \simeq 0,016, \quad (23)$$

$$\eta(t_*) \simeq \frac{3}{2N(\phi_*) + 3} \simeq 0,024. \quad (24)$$

Estos valores son mucho menores que uno, lo cual es coherente con lo anotado justo después de las Ecs. (18) y (19). Ahora bien, con el fin de generar estructura a gran escala, se debe satisfacer la normalización de COBE (Lyth & Liddle, 2009):

$$\frac{V(\phi_*)}{\epsilon(t_*)} = (0,027M_P)^4, \quad (25)$$

de lo que se concluye que

$$\frac{\frac{1}{4}\lambda [4M_P^2(2N(\phi_*) + 3)]^2}{0,016} \simeq (0,027M_P)^4, \quad (26)$$

$$\implies \lambda \simeq 1,41 \times 10^{-13}. \quad (27)$$

Los últimos análisis realizados en el LHC del CERN (en conjunto con los resultados obtenidos por el LEP del CERN (Abbiendi *et. al.*, 2003)) revelaron que el valor mínimo que podría tener la masa del bosón escalar de Higgs es 115.5 GeV (At LAs Collaboration, 2012). De acuerdo a esto, y dado que la masa del bosón de Higgs es expresada como (Kane, 1993)

$$M_H^2 = 2\lambda v^2, \quad (28)$$

el mínimo valor que podría tener  $\lambda$  es

$$\lambda = \frac{M_H^2}{2v^2} \geq \frac{(115,5)^2}{2 \cdot (246)^2} \simeq 0,11. \quad (29)$$

Así que, el valor encontrado para  $\lambda$  en la Ec. (27), consistente con la generación de inflación primordial del tipo rodadura lenta, es inconsistente con la cota mínima para la masa del bosón de Higgs en 12 órdenes de magnitud.

De esta manera, se ha demostrado que ninguna de las regiones del potencial escalar de Higgs, cuando éste se encuentra acoplado de forma mínima a la gravedad, es adecuada para la generación primordial del tipo rodadura lenta; en primer lugar porque las dos primeras regiones violan las condiciones de rodadura lenta, y en segundo lugar porque, a pesar de que en la tercera región sí se satisfacen las condiciones de rodadura lenta, el valor de la constante de autoacoplamiento  $\lambda$  consistente con inflación es muy pequeño comparado con la cota mínima sobre ella proveniente de la cota mínima para la masa del bosón de Higgs.

### 3. el campo escalar de Higgs acoplado de forma no mínima a la gravedad

Se considerará ahora el sector escalar del ME acoplado de forma no mínima a la gravedad. Al redefinir ahora  $\varphi = h$ , e ignorando las interacciones con los sectores de fermiones y de bosones vectoriales, la acción a estudiar tiene la forma (**Bezrukov & shaposhnikov**, 2008)

$$S_J = \int d^4x \sqrt{-g} \left\{ -\frac{M_P^2 + \xi h^2}{2} R - \frac{\partial_\mu h \partial^\mu h}{2} - \frac{\lambda}{4} (h^2 - v^2)^2 \right\}, \quad (30)$$

en donde  $g$  es el determinante de la métrica  $g_{\mu\nu}$  para un Universo homogéneo e isótropo, y  $\xi$  es una constante de acoplamiento que satisface  $1 \ll \xi \ll 10^{32}$ . La expresión en la Ec. (30), en la que el término cinético para  $h$  es canónico, pero en la que a su vez  $h$  está acoplado de forma no mínima a la gravedad, se dice que corresponde a la acción en el marco de Jordan (**Wald**, 1984). Por el contrario, una acción en la que el término cinético pueda eventualmente ser no canónico, pero en donde el campo escalar en cuestión es acoplado de forma mínima a la gravedad, se dice que está escrita en el marco de Einstein (**Wald**, 1984).

La transformación conforme que lleva la acción desde el marco de Jordan hasta el marco de Einstein es descrita como

$$\hat{g}_{\mu\nu} = \Omega^2 g_{\mu\nu}, \quad (31)$$

en donde  $\hat{g}_{\mu\nu}$  es la nueva métrica, en el marco de Einstein, y  $g_{\mu\nu}$  es la métrica en el marco de Jordan. A partir de esta transformación se define un nuevo escalar de Ricci  $\hat{R}$ , en el marco de Einstein, dado por (**Wald**, 1984)

$$R = \Omega^2 \hat{R} - 6\hat{g}^{\mu\nu} (\Omega \Omega_{,\mu\nu} - \Omega_{,\mu} \Omega_{,\nu}), \quad (32)$$

en donde las comas denotan derivadas ordinarias con respecto a la coordenada respectiva. Reemplazando las expresiones (31) y (32) en la Ec. (30), se obtiene

$$S_E = \int d^4x \Omega^{-4} \sqrt{-\hat{g}} \left\{ -\frac{M_P^2}{2} \left( 1 + \frac{\xi h^2}{M_P^2} \right) * \left( \Omega^2 \hat{R} - 6\hat{g}^{\mu\nu} [\Omega \Omega_{,\mu\nu} - \Omega_{,\mu} \Omega_{,\nu}] \right) - \Omega^2 \frac{\partial_\mu h \partial^\mu h}{2} - \frac{\lambda}{4} (h^2 - v^2)^2 \right\}. \quad (33)$$

Se asumirá ahora que la forma funcional de  $\Omega$  está dada por (**Bezrukov & shaposhnikov**, 2008)

$$\Omega^2 = 1 + \frac{\xi h^2}{M_P^2}. \quad (34)$$

Así, la acción en el marco de Einstein se reduce a

$$S_E = \int d^4x \sqrt{-\hat{g}} \left\{ -\frac{M_P^2}{2} \hat{R} - 6\frac{M_P^2}{2} \Omega^{-2} \hat{g}^{\mu\nu} \Omega_{,\mu} \Omega_{,\nu} - \Omega^{-2} \frac{\partial_\mu h \partial^\mu h}{2} - \frac{\lambda}{4} \Omega^{-4} (h^2 - v^2)^2 \right\}, \quad (35)$$

en donde el segundo término de la segunda línea en la Ec. (33):

$$\int d^4x \sqrt{-\hat{g}} \frac{M_P^2}{2} 6\Omega^{-1} \hat{g}^{\mu\nu} \Omega_{,\mu\nu}, \quad (36)$$

se hace cero en virtud al teorema de la divergencia y a la suposición de que el valor de  $h$  en el infinito es cero. Teniendo en cuenta la Ec. (34), se obtiene

$$\Omega_{,\mu} = \frac{\xi h}{\Omega M_P^2} h_{,\mu}, \quad (37)$$

con lo que el segundo término de la Ec. (35) se escribe

$$-\frac{6M_P^2\Omega^{-2}}{2} \left( \frac{\xi^2 h^2}{\Omega^2 M_P^4} \hat{g}^{\mu\nu} h_{,\mu} h_{,\nu} \right) = -\frac{6\xi^2 h^2}{2\Omega^4 M_P^2} \hat{g}^{\mu\nu} h_{,\mu} h_{,\nu} \quad (38)$$

el cual se puede agrupar con el tercer término de la Ec. (35) para así obtener

$$-\frac{\partial_\mu h \partial^\mu h}{2\Omega^2} \left( 1 + \frac{6\xi^2 h^2}{M_P^2 \Omega^2} \right) = -\frac{\partial_\mu h \partial^\mu h}{2} \left( \frac{\Omega^2 + 6\xi^2 h^2 / M_P^2}{\Omega^4} \right) \quad (39)$$

Con el fin de que este último término corresponda a un término cinético canónico, se define la nueva variable  $\chi$ , tal que (**Bezrukov & Shaposhnikov, 2008**)

$$\frac{d\chi}{dh} = \sqrt{\frac{\Omega^2 + 6\xi^2 h^2 / M_P^2}{\Omega^4}}. \quad (40)$$

Así, y teniendo en cuenta que

$$\begin{aligned} \frac{\partial\chi}{\partial x^\mu} &= \frac{d\chi}{dh} \frac{\partial h}{\partial x^\mu}, \\ \Rightarrow \frac{\partial_\mu \chi \partial^\mu \chi}{2} &= \frac{\partial_\mu h \partial^\mu h}{2} \left( \frac{d\chi}{dh} \right)^2, \end{aligned} \quad (41)$$

se llega finalmente a la acción en el marco de Einstein  $S_E$  para un campo  $\chi$  con término cinético canónico,

$$S_E = \int d^4x \sqrt{-\hat{g}} \left\{ -\frac{M_P^2}{2} \hat{R} - \frac{\partial_\mu \chi \partial^\mu \chi}{2} - U(\chi) \right\}, \quad (42)$$

y cuyo potencial adopta la forma

$$U(\chi) = \frac{\lambda}{4\Omega^4(\chi)} (h^2(\chi) - v^2)^2. \quad (43)$$

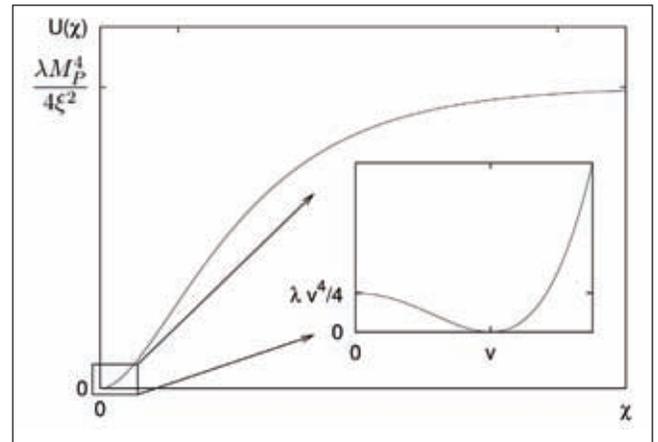
Con base en la Ec. (40), se determinará ahora la dependencia funcional explícita del potencial  $U(\chi)$  con respecto al campo escalar  $\chi$ . Un análisis de dicha dependencia funcional revelará la existencia de dos regiones vitales para el adecuado funcionamiento de este modelo. En la primera región, se reproduciría de la fenomenología de física de partículas asociada al Higgs; en la segunda región se podrá obtener inflación del tipo rodadura lenta a su vez que se generará satisfactoriamente estructura a gran escala. En primera instancia, se analizará el potencial para valores de  $h$  muy pequeños en comparación con  $M_P \xi$ . Así, y teniendo en cuenta que  $\xi \gg 1$ , se observa de la Ec. (34) que  $\Omega^2 \simeq 1$ , lo cual conduce a  $d\chi/dh \simeq 1$  de acuerdo a la Ec. (40). De esta manera,

$$d\chi \simeq dh \quad \Rightarrow \quad h \simeq \chi. \quad (44)$$

Así, el campo escalar  $\chi$  en esta región es el mismo campo escalar de Higgs  $h$ , en tanto que el potencial  $U(\chi)$  adquiere la estructura usual para el potencial de Higgs cuando éste se encuentra acoplado de forma mínima a la gravedad:

$$U(\chi) \simeq \frac{\lambda}{4} (\chi^2 - v^2)^2. \quad (45)$$

La anterior expresión revela que, para valores de  $\chi$  mucho menores que  $M_P \xi$ , se reproduce la fenomenología de física de partículas asociada al campo escalar de Higgs. La Figura 2 presenta el potencial efectivo  $U(\chi)$  para las dos regiones anteriormente mencionadas; en un pequeño recuadro a la izquierda, del cual se hace un aumento a la derecha de la gráfica, se observa que la forma del potencial, para valores de  $h$  mucho menores que  $M_P \xi$ , es la usual forma de sombrero mexicano para el campo escalar de Higgs acoplado de forma mínima a la gravedad que ya se había presentado en la Figura 1.



**Figura 2:** Potencial Efectivo  $U(\chi)$  en el marco de Einstein. En la primera región, correspondiente al pequeño recuadro a la izquierda, del cual se hace un aumento a la derecha, el potencial adopta la usual forma de sombrero mexicano para el campo escalar de Higgs acoplado de forma mínima a la gravedad (véase la Figura 1). En la segunda región, correspondiente al resto de la gráfica, el potencial presenta una zona de alta planitud para valores de  $\chi$  lo suficientemente grandes. Como se discute en la Sección 4, tal planitud del potencial hace posible que en esta región se presente inflación del tipo rodadura lenta en coherencia con la generación de estructura a gran escala (**Bezrukov & Shaposhnikov, 2008**).

En segunda instancia, se analizará el potencial para valores de  $h$  muy grandes en comparación con  $M_P \xi$ . Así, a partir de la Ec. (34) se obtiene

$$\Omega^2 \simeq \frac{\xi h^2}{M_P^2}, \quad (46)$$

con lo cual se deduce, a partir de la Ec. (40), que

$$\begin{aligned} \frac{d\chi}{dh} &\simeq \sqrt{\frac{\xi h^2/M_P^2 + 6\xi^2 h^2/M_P^2}{\xi^2 h^4/M_P^4}} \\ &= \sqrt{\frac{1 + 6\xi}{\xi} \cdot \frac{M_P^2}{h^2}} \simeq \frac{\sqrt{6}M_P}{h}, \end{aligned} \quad (47)$$

en donde nuevamente se ha empleado el hecho de que  $\xi \gg 1$ . De esta manera, por integración se obtiene

$$\begin{aligned} \int_{\chi_0}^{\chi} d\chi &= \int_{h_0}^h \frac{\sqrt{6}M_P}{h} dh, \\ \Rightarrow \chi - \chi_0 &= \sqrt{6}M_P \ln\left(\frac{h}{h_0}\right), \end{aligned} \quad (48)$$

en donde  $h_0$  se puede identificar con el límite inferior de la aproximación realizada sobre  $h$ , es decir,  $h_0 = M_P/\sqrt{\xi}$ , y  $\chi_0$  se puede asumir por el momento igual a  $h_0$  como resultado de pretender conectar las soluciones para  $\chi$  correspondientes a las dos regiones en el punto de encuentro entre ellas. La expresión (48) queda entonces escrita como

$$\chi - \frac{M_P}{\sqrt{\xi}} = \sqrt{6}M_P \ln\left(\frac{h}{M_P/\sqrt{\xi}}\right), \quad (49)$$

de donde se puede observar que

$$\chi \gg \sqrt{6}M_P, \quad (50)$$

para lo cual se ha tenido en cuenta que  $h \gg M_P/\sqrt{\xi}$  y  $\xi \gg 1$ . La anterior expresión redefine el valor para  $\chi_0$  supuesto anteriormente:

$$\chi_0 = \sqrt{6}M_P, \quad (51)$$

de la que se obtiene la expresión para el campo escalar de Higgs  $h$  en términos del campo escalar  $\chi$  a partir de la Ec. (48):

$$\begin{aligned} h &= \frac{M_P}{\sqrt{\xi}} \exp\left[(\chi - \sqrt{6}M_P)/\sqrt{6}M_P\right] \\ &\simeq \frac{M_P}{\sqrt{\xi}} \exp\left[\frac{\chi}{\sqrt{6}M_P}\right]. \end{aligned} \quad (52)$$

Por otra parte, para evitar el régimen de gravedad inducida (Zee, 1979), se debe asegurar que

$$\frac{\xi v^2}{2} R \ll \frac{M_P^2}{2} R, \quad (53)$$

de acuerdo a la Ec. (30). Lo anterior implica, para la segunda región correspondiente a valores de  $h$  mucho mayores que  $M_P/\sqrt{\xi}$ , que

$$h^2 \gg \frac{M_P^2}{\xi} \gg v^2. \quad (54)$$

Finalmente, con base en las Ecs. (46) y (52), el parámetro  $\Omega^2$  puede ahora escribirse en función de  $\chi$  de la siguiente manera:

$$\Omega^2 = 1 + \exp\left[\frac{2\chi}{\sqrt{6}M_P}\right]. \quad (55)$$

Así, reemplazando las Ecs. (52), (54), y (55) en la Ec. (43), el potencial para el campo escalar  $\chi$  adquiere la forma

$$\begin{aligned} U(\chi) &= \frac{\lambda}{4\Omega^4(\chi)} (h^2(\chi) - v^2)^2 \\ &\simeq \left(1 + \exp\left[\frac{2\chi}{\sqrt{6}M_P}\right]\right)^{-2} \frac{\lambda M_P^4}{4\xi^2} \exp\left[\frac{4\chi}{\sqrt{6}M_P}\right], \\ \Rightarrow U(\chi) &= \frac{\lambda M_P^4}{4\xi^2} \left(1 + \exp\left[-\frac{2\chi}{\sqrt{6}M_P}\right]\right)^{-2}. \end{aligned} \quad (56)$$

La anterior expresión revela que el potencial para el campo escalar  $\chi$  es exponencialmente plano para  $\chi \gg \sqrt{6}M_P$ . El potencial efectivo  $U(\chi)$  en el marco de Einstein es presentado en la Figura 2 y, como se observa, el potencial presenta una zona de alta planitud para valores de  $\chi$  lo suficientemente grandes. Como se verá en la próxima sección, tal planitud del potencial hace posible que en la segunda región se presente inflación del tipo rodadura lenta exitosamente y se genere estructura a gran escala de forma satisfactoria (Bezrukov & Shaposhnikov, 2008).

Antes de finalizar esta sección, se debe señalar que la viabilidad de este modelo ha sido puesta en entredicho, casi desde el mismo momento de su concepción, debido a que la teoría podría ser inestable a la escala de energía de inflación (elias-Miro *et. al.*, 2011). Lo anterior implicaría la necesidad de incluir correcciones cuánticas, lo que a su vez ha motivado la formulación de cuatro propuestas alternativas a la presentada en este artículo: en la primera de ellas, el modelo nuevo de inflación Higgs (Germani & Kehagias, 2010a; Germani & Kehagias, 2010b), el término cinético del campo escalar es acoplado al tensor de Einstein (Granda, 2011; Granda & Cardona, 2010) teniendo como efecto un cambio en la normalización del campo durante inflación que permite la generación exito-

sa de estructuras a gran escala; en la segunda propuesta, la inflación cinética que corre (**nakayama & takahashi**, 2010; **nakayama & takahashi**, 2011), la introducción de un término cinético no estándar simplemente cambia la normalización del campo escalar en algún dominio del espacio del campo, conduciendo esencialmente al mismo efecto generado en la anterior propuesta; en la tercera propuesta, la G-inflación de Higgs (**Kamada, Kobayashi, Yamaguchi, & Yokoyama**, 2011), se incorpora la interacción de tipo Galileón más bajo orden no trivial (**Deffayet, Deser, & esposito-Farese**, 2009; **Deffayet, esposito-Farese, & Vikman**, 2009; **nicolis, Rattazzi, & trincerini**, 2009) a la acción, lo cual permite que los nuevos términos introducidos actúen como términos de fricción extra, suavizando de forma efectiva el potencial escalar y generando así, de forma exitosa, la estructura a gran escala; la cuarta propuesta, denominada el modelo de inflación de Einstein que corre (**Kamada et. al.**, 2012), corresponde a una variante adicional de los modelos anteriormente descritos como resultado de que éstos caen en una subclase de la G-inflación generalizada (**Kobayashi, Yamaguchi, & Yokoyama**, 2011), la cual corresponde al modelo inflacionario más general de un único campo que posee ecuaciones de campo escalar y gravitacional de segundo orden. La fenomenología de estas cuatro propuestas es bastante rica y, adicionalmente, la presencia de derivadas de alto orden y el acoplamiento al tensor de Einstein podrían relajar las tensiones existentes con respecto a la estabilidad de la teoría a la escala inflacionaria (**Kamada et. al.**, 2012); sin embargo, una discusión más profunda de cada una de estas propuestas va más allá de los propósitos del presente artículo.

#### 4. Inflación del tipo rodadura lenta y generación de estructura a gran escala a partir del Campo escalar de Higgs acoplado de forma no mínima a la gravedad

Como se vio en la sección anterior, la expresión para el potencial efectivo en la Ec. (56) señala que existe una región de alta planitud, para valores lo suficientemente grandes de  $\chi$ , que podría dar origen a un período inflacionario primordial del tipo rodadura lenta. Para determinar claramente si esto es posible, se calculan los parámetros de rodadura lenta a partir del potencial efectivo en la Ec. (56), teniendo en cuenta que, para esta región,  $\chi \gg \sqrt{6}M_P$  y, adicionalmente,  $h$  viene expresado por la Ec. (52) con  $h \gg M_P/\sqrt{\xi}$  (**Bezrukov & shaposhnikov**, 2008):

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{M_P^2}{2} \left( \frac{dU(\chi)/d\chi}{U(\chi)} \right)^2 = \frac{4}{3 \left( 1 + \exp \left[ \frac{2\chi}{\sqrt{6}M_P} \right] \right)^2} \\ &\simeq \frac{4M_P^4}{3\xi^2 h^4}, \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} \eta &= M_P^2 \frac{d^2U(\chi)/d\chi^2}{U(\chi)} = -\frac{4}{3 \left( 1 + \exp \left[ \frac{2\chi}{\sqrt{6}M_P} \right] \right)^*} \left[ 1 - \frac{3}{\left( 1 + \exp \left[ \frac{2\chi}{\sqrt{6}M_P} \right] \right)} \right] \\ &\simeq -\frac{4M_P^2}{3\xi h^2}. \end{aligned} \quad (58)$$

Se observa de esta manera que tanto  $\epsilon$  como  $|\eta|$  son mucho menores que 1; por lo tanto, esta región es compatible con un período inflacionario primordial del tipo rodadura lenta.

De forma similar a como se realizó en la Sección 2, se determina ahora el monto de inflación  $N(\chi_*)$  desde que el campo escalar  $\chi$  tiene un valor  $\chi$  hasta el final de inflación cuando  $\chi = \chi_{\text{end}}$ :

$$\begin{aligned} N &= \frac{1}{M_P^2} \int_{\chi_{\text{end}}}^{\chi_*} \frac{U(\chi)}{dU(\chi)/d\chi} d\chi \\ &= \sqrt{\frac{3}{8M_P^2}} \int_{\chi_{\text{end}}}^{\chi_*} \left( 1 + \exp \left[ \frac{2\chi}{\sqrt{6}M_P} \right] \right) d\chi \quad (59) \\ &\simeq \frac{3}{4} \frac{h_*^2 - h_{\text{end}}^2}{M_P^2/\xi}. \end{aligned}$$

Escogiendo  $N(\chi_*) \simeq 60$ , correspondiente al tiempo  $t_*$  en el cual el Universo sale del horizonte (**Lyth & Liddle**, 2009), y reemplazando

$$h_{\text{end}}^2 \simeq \frac{4M_P^2}{3\xi}, \quad (60)$$

la cual se determina a partir de la violación de las condiciones de rodadura lenta, se encuentra que

$$h_*^2 \simeq 81,33 \frac{M_P^2}{\xi}. \quad (61)$$

Así, los parámetros de rodadura lenta  $\epsilon$  y  $\eta$  en el tiempo  $t_*$  son:

$$\epsilon(t_*) \simeq 2,02 \times 10^{-4}, \quad (62)$$

$$\eta(t_*) \simeq -1,64 \times 10^{-2}. \quad (63)$$

El índice espectral  $n_s = 1 - 6\epsilon + 2\eta$  (Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008) es entonces  $n_s \simeq 0,966$ , mientras que la razón tensor a escalar  $r = 16\epsilon$  (Dodelson, 2003; Lyth & Liddle, 2009; Mukhanov, 2005; Weinberg, 2008) adopta el valor  $r \simeq 0,0032$ . Para  $N(\chi_{\text{end}}) \simeq 50$ ,  $n \simeq 0,959$  y  $r \simeq 0,0046$ . Los valores predichos, tanto para  $N(\chi_{\text{end}}) \simeq 60$  como para  $N(\chi_{\text{end}}) \simeq 50$ , se encuentran dentro del contorno de 68% de nivel de confianza ( $1\sigma$ ) correspondiente al séptimo año de resultados del satélite WMAP (Komatsu et al., 2011) (véase la Figura 3). Se puede concluir entonces que la generación de estructura a gran escala en este modelo es exitosa.

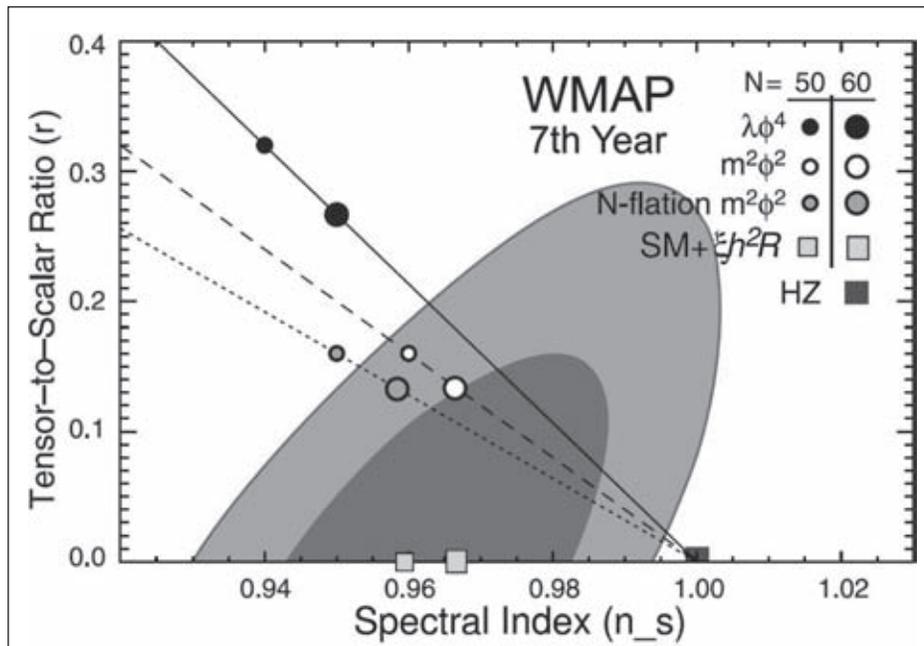
Finalmente, a partir de la normalización de COBE presentada en la Ec. (25), pero esta vez aplicada al potencial efectivo  $U(h)$ , introduciendo la Ec. (61), y reemplazando el autoacoplamiento  $\lambda$  por la relación entre la masa del bosón de Higgs  $M_H$  y el valor esperado en el vacío  $v$  presentada en la Ec. (28), se encuentra que

$$\begin{aligned} \frac{U(h_*)}{\epsilon(t_*)} &\simeq \frac{3}{16} \lambda h_*^4 \simeq 620,58 \frac{M_H^2}{v^2} \frac{M_P^4}{\xi^2} \\ &\simeq (0,027 M_P)^4, \\ \implies \xi &\simeq 48000 \frac{M_H}{\sqrt{2}v}. \end{aligned} \tag{64}$$

Debido a que la masa del bosón de Higgs se encuentra en el rango  $115,5 \text{ GeV} < M_H < 127 \text{ GeV}$  (Abbiendi et al., 2003; ATLAS Collaboration, 2012; CMS Collaboration, 2012), se concluye que la constante de acoplamiento no mínimo a la gravedad  $\xi$  debe estar en el rango:

$$16000 \lesssim \xi \lesssim 17500, \tag{65}$$

lo cual es coherente con la suposición inicial de que  $1 \ll \xi \ll 10^{32}$ . Así, se concluye que la generación de la estructura a gran escala en este escenario es exitosa.



**Figura 3:** Ventana disponible de parámetros para la razón tensor a escalar  $r$  vs el índice espectral  $n_s$  de acuerdo al séptimo año de resultados del satélite WMAP (Komatsu et al., 2011). La región interna (en gris oscuro) corresponde al 68% de nivel de confianza, en tanto que la región externa (en gris claro) corresponde al 95% de nivel de confianza. La gráfica presenta las predicciones, para los montos de inflación  $N(t_*) = 50$  y  $N(t_*) = 60$ , de diferentes modelos inflacionarios tales como los modelos de potencial cuadrático y cuártico asociados a la inflación caótica (Linde, 1983), el modelo de N-flation (Dimopoulos, Kachru, McGreevy, & Wacker, 2008), y el modelo considerado en este artículo correspondiente al inflatón identificado con el bosón de Higgs del ME acoplado de forma no mínima a la gravedad (Bezrukov & Shaposhnikov, 2008). También se presenta la predicción correspondiente al espectro invariante de escala de Harrison-Zel'dovich (Harrison, 1970; Zel'dovich, 1972). Se observa que las predicciones del modelo considerado en este artículo se encuentran confortablemente dentro de la región de 68% de nivel de confianza, a diferencia de las predicciones para los otros modelos.

## 5. Conclusiones

En este artículo se demostró que el campo escalar de Higgs del ME, acoplado de forma mínima a la gravedad, no puede ser identificado con el inflatón debido a que no puede generar inflación del tipo rodadura lenta en coherencia con la generación de estructura a gran escala.

Sin embargo, se argumentó que sí es posible generar inflación del tipo rodadura lenta, en concordancia con la generación de estructura a gran escala, a partir del campo escalar de Higgs del ME, en tanto éste se encuentre acoplado de forma no mínima a la gravedad (**Bezrukov & shaposhnikov**, 2008). Con el fin de estar lejos de los regímenes de acoplamiento mínimo a la gravedad y gravedad inducida, se consideró que la constante de acoplamiento no mínima a la gravedad  $\xi$  estuviese en el rango  $1 \ll \xi \ll 10^{32}$ . Como resultado final se obtuvo que  $16000 \lesssim \xi \lesssim 17500$  con el fin de reproducir las cotas inferior y superior sobre la masa del bosón escalar de Higgs.

La predicción específica sobre el índice espectral  $n_s$  y la razón tensor a escalar  $r$  permite que este modelo pueda distinguirse fácilmente de otros modelos inflacionarios de generación de estructura a gran escala (véase la Figura 3). En particular, se encontró que tales parámetros se encuentran dentro del contorno de 68% de nivel de confianza ( $1\sigma$ ) correspondiente al séptimo año de resultados del satélite WMAP (**Komatsu et al.**, 2011).

**Agradecimientos:** Y.R. cuenta con el apoyo financiero de COLCIENCIAS mediante proyecto de investigación número 1102-487-25992 CT-460-2009, y de la DIF (UIS) mediante proyecto de investigación número 5177.

## Referencias

Abbiendi G. *et al.*, 2003. Search for the Standard Model Higgs Boson at LEP, Phys. Lett. B **565**, 61.

ALEPH Collaboration *et al.*, 2010. Precision Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model, arXiv:1012.2367 [hep-ex].

Allahverdi R., Brandenberger R., Cyr-Racine F.-Y., & Mazumdar A., 2010. Reheating in Inflationary Cosmology: Theory and Applications, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **60**, 27.

ATLAS Collaboration, 2012. Combined Search for the Standard Model Higgs Boson Using up to 4.9 fb<sup>-1</sup> of  $pp$  Collision Data at  $\sqrt{s}=7$  TeV with the ATLAS Detector at the LHC, Phys. Lett. B **710**, 49.

Barbinsky A. O., Kamenshchik A. Yu., & Starobinsky A. A., 2008. Inflation Scenario Via the Standard Model Higgs Boson and LHC, JCAP **0811**, 021.

Bennett C. L. *et al.*, 2003. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results, Astrophys. J. Suppl. Ser. **148**, 1.

Bezrukov F. & Shaposhnikov M., 2008. The Standard Model Higgs Boson as the Inflaton, Phys. Lett. B **659**, 703.

Bezrukov F. L., 2008. Non-Minimal Coupling in Inflation and In-flating with the Higgs Boson, arXiv: 0810.3165 [hep-ph].

Bezrukov F. L., Magnin A., & Shaposhnikov M., 2009. Standard Model Higgs Boson Mass from Inflation, Phys. Lett. B **675**, 88.

Cervantes-Cota J. L. & Dehnen H., 1995. Induced Gravity Inflation in the Standard Model of Particle Physics, Nucl. Phys. B **442**, 391.

CMS Collaboration, 2012. Combined Results of Searches for the Standard Model Higgs Boson in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV, ar-Xiv:1202.1488 [hep-ex].

Deffayet C., Deser S., & Esposito-Farese G., 2009. Generalized Galileons: All Scalar Models whose Curved Background Extensions Maintain Second-Order Field Equations and Stress-Tensors, Phys. Rev. D **80**, 064015.

Deffayet C., Esposito-Farese G., & Vikman A., 2009. Covariant Galileon, Phys. Rev. D **79**, 084003.

Dimopoulos S., Kachru S., McGreevy J., & Wacker J. G., 2008. Inflation, JCAP **0808**, 003.

Dodelson S., 2003. Modern Cosmology, Elsevier Academic Press, London -UK.

Elias-Miro J. *et al.*, 2011. Higgs Mass Implications on the Stability of the Electroweak Vacuum, arXiv:1112.3022 [hep-ph].

Germani C. & Kehagias A., 2010a. New Model of Inflation with Non-Minimal Derivative Coupling of Standard Model Higgs Boson to Gravity, Phys. Rev. Lett. **105**, 011302.

Germani C. & Kehagias A., 2010b. Cosmological Perturbations in the New Higgs Inflation, JCAP **1005**, 019. Erratum-ibid. **1006**, E01.

Granda L. N., 2011. Inflation Driven by Scalar Field with Non-Minimal Kinetic Coupling with Higgs and Quadratic Potentials, JCAP **1104**, 016.

Granda L. N. & Cardona W., 2010. General Non-Minimal Kinetic-Coupling to Gravity, JCAP **1007**, 021.

Griffiths D., 2008. Introduction to Elementary Particles, Wiley-VCH, Weinheim - Germany.

Guth A. & Pi S., 1982. Fluctuations in the New Inflationary Universe, Phys. Rev. Lett. **49**, 1110.

Guth A. H., 1981. The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems, Phys. Rev. D **23**, 347.

Harrison E. R., 1970. Fluctuations at the Threshold of Classical Cosmology, Phys. Rev. D **1**, 2726.

Kamada K. *et al.*, 2012. Generalized Higgs Inflation, arXiv:1203.4059 [hep-ph].

Kamada K., Kobayashi T., Yamaguchi M., & Yokoyama J., 2011. Higgs G-Inflation, Phys. Rev. D **83**, 083515.

Kane G., 1993. Modern Elementary Particle Physics: The Fundamental Particles and Forces?, Westview Press, Boulder -USA.

Kobayashi T., Yamaguchi M., & Yokoyama J., 2011. Generalized G-Inflation: Inflation with the Most General Second-Order Field Equations, Prog. Theor. Phys. **126**, 511.

- Komatsu E. *et al.*, 2011. Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **192**, 18.
- Linde A., 1982. A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution of the Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy and Primordial Monopole Problems, *Phys. Lett. B* **108**, 389.
- Linde A. D., 1983. Chaotic Inflation, *Phys. Lett. B* **129**, 177.
- Lyth D. H. & Liddle A. R., 2009. *The Primordial Density Perturbation: Cosmology, Inflation and the Origin of Structure*, Cambridge University Press, Cambridge - UK.
- Mukhanov V. F., 2005. *Physical Foundations of Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge -UK.
- Nakamura K. *et al.*, 2010. The 2010 Review of Particle Physics, *J. Phys. G* **37**, 075021.
- Nakayama K. & Takahashi F., 2010. Running Kinetic Inflation, *JCAP* **1011**, 009.
- Nakayama K. & Takahashi F., 2011. Higgs Chaotic Inflation in Standard Model and NMSSM, *JCAP* **1102**, 010.
- Nicolis A., Rattazzi R., & Trincherini E., 2009. The Galileon as a Local Modification of Gravity, *Phys. Rev. D* **79**, 064036.
- Penzias A. A. & Wilson R. W., 1965. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s, *Astrophys. J.* **142**, 419.
- Rodríguez Y., 2009. *The Origin of the Large-Scale Structure in the Universe: Theoretical and Statistical Aspects*, LAP - Lambert Academic Publishing, Saarbrücken - Germany. Also available as PhD Thesis, Lancaster University, Lancaster - UK, 2005. arXiv:astro-ph/0507701.
- Smoot G. F. *et al.*, 1992. Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First-Year Maps, *Astrophys. J.* **396**, L1.
- Spokoiny B.L., 1984. Inflation and Generation of Perturbations in Broken Symmetric Theory of Gravity, *Phys. Lett. B* **147**, 39.
- Starobinsky A. A., 1979. Spectrum of Relict Gravitational Radiation and the Early State of the Universe, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **30**, 719 [*JETP Lett.* **30**, 682].
- 't Hooft G., 1980. Gauge Theories of the Forces Between Elementary Particles, *Sci. Am.* **242**, 90.
- Van der Bij J.J., 1994. Can Gravity Make the Higgs Particle Decouple?, *Acta Phys. Pol. B* **25**, 827.
- Van der Bij J.J., 1995. Can Gravity Play a Role at the Electroweak Scale?, *Int. J. Phys.* **1**, 63.
- Wald R. M., 1984. *General Relativity*, The University of Chicago Press, Chicago - USA.
- Weinberg S., 1972. *Gravitation and Cosmology*, John Wiley & Sons, New York - USA.
- Weinberg S., 2008. *Cosmology*, Oxford University Press, Oxford - UK.
- Zee A., 1979. Broken-Symmetric Theory of Gravity, *Phys. Rev. Lett.* **42**, 417.
- Zel'dovich Y. B., 1972. A Hypothesis, Unifying the Structure and the Entropy of the Universe, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **160**, 1P.

Recibido: Febrero 22 de 2011.

Aceptado para su publicación: Febrero 3 de 2012.

# MAGNETRÓN DESBALANCEADO: CONFIGURACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO Y SU CORRELACIÓN CON EL CAMPO DE 2 ESPIRAS CONCÉNTRICAS

Ulises Piratoba Morales<sup>1</sup>, Álvaro Mariño Camargo<sup>2</sup>, Jhon Jairo Olaya Flórez<sup>3</sup>

## Resumen

**Piratoba Morales, u.; A. Mariño Camargo; J.J. Olaya Flórez:** Magnetron Desbalanceado: Configuración del campo magnético y su correlación con el campo de 2 espiras concéntricas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **36** (138): 37-44, 2012. ISSN 0370-3908.

Los magnetrones desbalanceados son cada vez más usados en investigación, tecnología y aplicaciones industriales, particularmente aquellas relacionadas con procesos de deposición física de vapor (PVD) usados en el crecimiento de películas delgadas (Marulanda *et al.*, 2011; Olaya *et al.*, 2011). Estas películas tienen amplias aplicaciones como recubrimientos duros, ópticos, decorativos y electrónicos. El empleo de dichos magnetrones, permite incrementar significativamente las velocidades de crecimiento de las películas y la eficiencia de los procesos, mejorándose ostensiblemente la calidad de las películas obtenidas. En este trabajo se midieron las componentes axial y radial de campos magnéticos generados por magnetrones desbalanceados con simetría axial; se encontró que el campo magnético de un magnetron construido con un imán cilíndrico y otro anular, concéntricos, se correlaciona muy bien con el campo magnético generado por 2 espiras coplanares y concéntricas, cuyas corrientes circulan en sentidos opuestos. El campo magnético teórico fue calculado aplicando la ley de Biot – Savart, y evaluado numéricamente con el programa MatLab.

**Palabras clave:** magnetron desbalanceado, UBMS, campo magnético

## ABSTRACT

Unbalanced magnetrons are increasingly used in research, technological and industrial applications, particularly those related with physical vapor deposition processes (PVD) used for the growth of thin films (Marulanda *et al.*, 2011; Olaya *et al.*, 2011). These films have many applications as hard, optical, decorative and electronic coatings. The use of such magnetrons can significantly increase the growth rates of the films and the process efficiency, which also improves significantly the quality of

<sup>1</sup> Departamento de Física, U. Nacional de Colombia, Bogotá y UPTC, Tunja, Colombia. Email: upiratobam@unal.edu.co - ulisesp3@hotmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Física, U. Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Email: amarinoca@unal.edu.co

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, U. Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Email: cjjolaya@unal.edu.co

the films obtained. In this work, measurements of the axial and radial components of the magnetic fields generated by an unbalanced magnetron with axial symmetry were carried out; it was found that the magnetic field of a magnetron built with a cylindrical and a concentric ring magnets with opposite polarities, correlated well with the magnetic field generated by two concentric coplanar loops, whose currents flow in opposite directions. The theoretical magnetic field was calculated applying the Biot - Savart law, and evaluated numerically using MatLab program.

**Key words:** unbalanced magnetron, UBMS, magnetic field.

## Introducción

El empleo de campos magnéticos ha permitido potenciar los procesos tecnológicos e investigativos que hacen uso de plasmas. Los campos magnéticos actúan sobre el plasma al afectar las trayectorias de iones y electrones (**Mattox**, 1998; **Bunshah**, 2001), permitiendo confinarlo o intensificarlo. Al aumentarse la trayectoria de las partículas cargadas, se incrementan las colisiones y con esto los procesos de ionización, la intensidad del plasma y en general, la eficiencia de los eventos allí presentes. En los procesos de obtención de películas delgadas asistidos por plasma, sus propiedades así como la eficiencia del proceso, dependen en gran medida de la configuración de campo magnético. En una excelente revisión **svadkovski et al.**, 2003 presentan y clasifican las diversas configuraciones que pueden tener uno o varios magnetrones y definen coeficientes para cuantificar el desbalance de cada magnetrón.

Para un magnetrón de simetría axial, que se obtiene con imán cilíndrico interno y otro anular externo (o un ensamble de varios imanes planos), podría darse que: a) los 2 imanes tengan intensidades similares, se le ha denominado magnetrón balanceado; b) el imán externo tenga una mayor intensidad que el interno, denominado magnetrón des balanceado, o que c) el imán interno tenga una mayor intensidad que el externo. Ésta última configuración no es muy usada, pero ha sido reportada para obtener recubrimientos porosos (**Kelly y Arnell**, 1998; **Kelly y Arnell**, 2000). En magnetrones des balanceados, la mayor intensidad del imán externo, permite que no todas las líneas de campo magnético se cierren frente al blanco; algunas de éstas se prolongan hasta el sustrato, permitiendo que muchos electrones sean extraídos del plasma, siguiendo trayectorias helicoidales y atrayendo iones hacia el sustrato, incrementando la relación  $J/J_A$  (densidad de flujo de iones  $J_i$  sobre densidad de flujo de átomos  $J_A$ ). El efecto neto es un incremento en la corriente iónica entre 2 y 10 veces la obtenida con magnetrones con-

vencionales. Investigadores como **Kelly y Arnell**, 1998 y 2000, consideran que de la relación  $J/J_A$ , dependen importantes características de las películas. Niveles altos de bombardeo iónico, son beneficiosos para mejorar la adhesión, pero de ser sostenidos o muy elevados, inducen la aparición de defectos en detrimento de la calidad de la película, o elevados niveles de esfuerzos compresivos que le disminuyen su adhesión al sustrato (**Komath et al.**, 1999). Con magnetrones des balanceados, es posible generar y mantener plasmas a muy bajas presiones, lo que permite mejorar la pureza química de las películas obtenidas (**Ikuta et al.**, 2009).

Estudios sobre las configuraciones de campo magnético en magnetrones convencionales o des balanceados, han sido reportados por **Biederman et al.**, 1999 quienes presentaron, en un esquema tridimensional, la intensidad del flujo magnético en diferentes puntos del plano ZR, igual que lo han hecho **Rodil et al.** 2007; **Klevets**, 2006 presenta criterios teóricos para optimizar los sistemas magnéticos, mientras que **Han et al.**, 2009, mediante la aplicación de series de polinomios, obtienen una distribución de la intensidad del campo magnético y hacen una representación en 3 dimensiones 3D, de la componente axial en el plano ZR.

En este trabajo se presentan las intensidades de campo magnético  $B$ , (sus componentes axial  $B_z$  y radial  $B_r$ ), medidas para un magnetrón Genco VT 100, y las un magnetrón formado por los 2 imanes de ferrita que se muestran en la Figura 1. Las medidas se tomaron con un Teslámetro de laboratorio **PHIWE**, usando un montaje mecánico que permite fijar con facilidad y precisión la sonda de efecto Hall, elementos también mostrados en la figura 1. Igualmente se calculan éstas componentes del campo magnético generado por 2 espiras de 1 y 2.5 cm de radio respectivamente, concéntricas y coplanares, cuyas corrientes circulan en sentidos opuestos, a efectos de hacer una comparación con las distribuciones de campo magnético obtenidas experimentalmente.

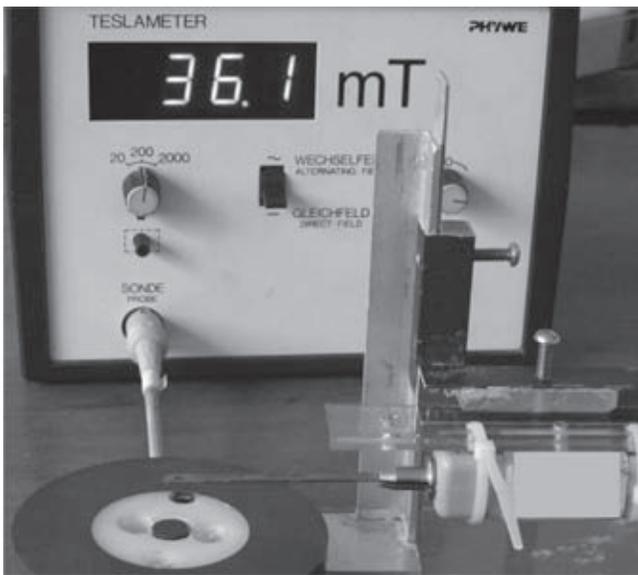


Figura 1. Teslámetro, magnetrón, sonda y montaje para ubicarla y medir  $B_z$  o  $B_r$

### Resultados: discusión y análisis

En las figuras 2A y 3A, se representan en 3D los valores de la componente axial  $B_z$  del vector intensidad de campo magnético como función de las distancias axial  $z$  y radial  $r$ . Se tomó como origen de éste sistema coordinado, el centro de la superficie de un blanco, (disco de cromo de 5 mm de espesor para el magnetrón Gencoa VT 100), y el centro de la cara anterior del imán central para el magnetrón de ferritas. Puede verse que

$B_z$  toma su máximo valor negativo en el origen del sistema coordinado y tiende a anularse rápidamente a medida que se aleja del magnetrón. Además, presenta 2 máximos positivos en el borde interno del magnetrón anular, que igualmente decaen rápidamente al alejarse de los imanes. Esta configuración prácticamente coincide con la calculada por Han *et al.*, 2009. Adicionalmente puede apreciarse que el campo magnético axial, es casi constante y de baja intensidad a distancias superiores a unos 4 cm. En las figuras 2B y 3B se presenta la componentes radiales  $B_r$  para los magnetrones citados, que ahora se anulan a lo largo del eje  $z$ ; presentan 2 máximos negativos en la posición del borde del imán cilíndrico interno y 2 máximos positivos en la posición del borde interno del imán anular exterior. Estos máximos, igualmente decaen rápidamente al alejarse de la superficie del magnetrón.

Las anteriores configuraciones de campo magnético, igualmente pueden ser generadas por la corriente que transportan espiras circulares, como se mostrará a continuación: la ley de Biot - Savart especifica que la contribución al campo magnético aportada por un elemento infinitesimal de corriente  $idl$ , en un punto cuya posición respecto al elemento de corriente la especifica el vector  $\vec{\rho}$  viene dada por

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idl \vec{\rho} \otimes \vec{\rho}}{\rho^3} \quad (1)$$

Con base en la figura 4

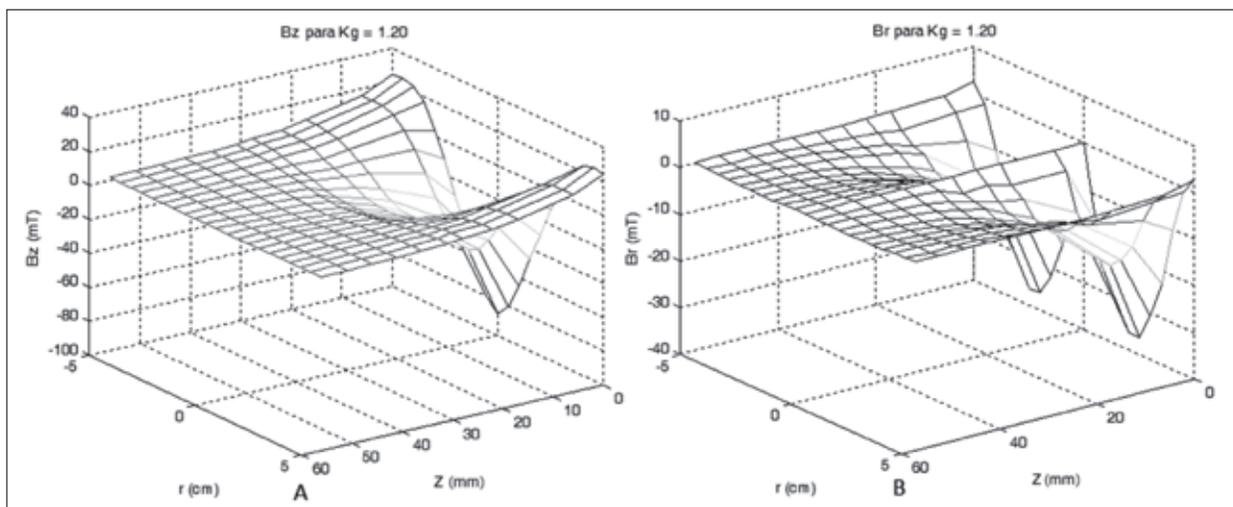


Figura 2. Intensidades de las componentes axial  $B_z$  (figura A), y radial  $B_r$  (figura B) del campo magnético generado por un magnetrón Gencoa VT 100.

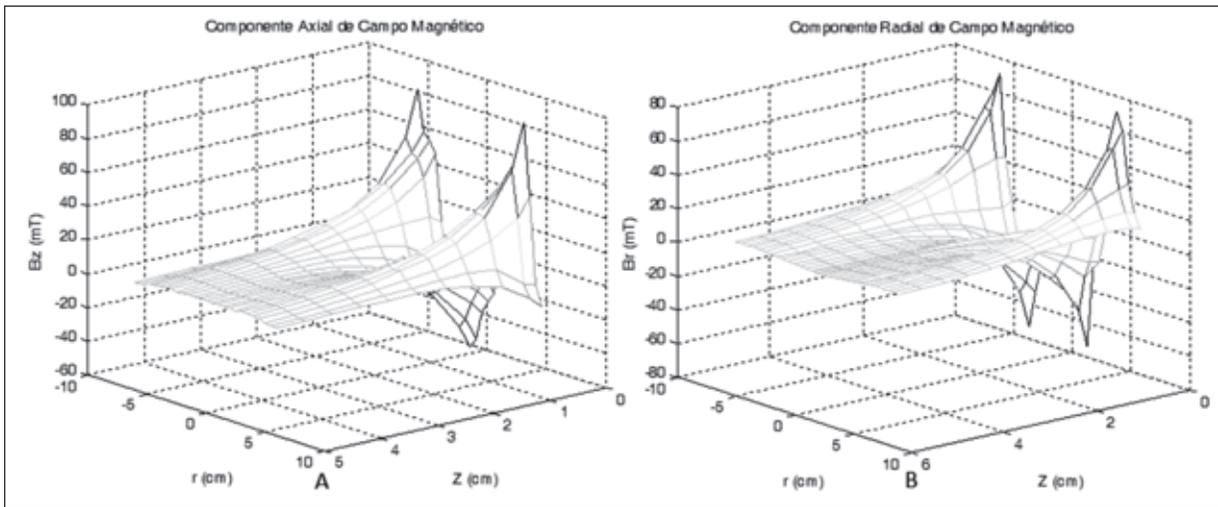


Figura 3. Intensidades de las componentes  $B_z$  y  $B_r$  del campo magnético generado por los imanes de figura 1.

$$\vec{\rho} = \vec{z} + \vec{r} - \vec{R} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \vec{R} &= R\hat{R} = R\cos\theta\hat{x} + R\sin\theta\hat{y}; \vec{r} = r\hat{x} \\ i\vec{dl} &= iRd\theta\hat{\theta} = -iR\sin\theta\hat{x} + iR\cos\theta\hat{y} \end{aligned} \tag{3}$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} \vec{\rho} &= (r - R\cos\theta)\hat{x} - R\sin\theta\hat{y} + z\hat{z} \\ i\vec{dl} \otimes \vec{\rho} &= (iRz\cos\theta)\hat{x} - (iRz\sin\theta)\hat{y} + (iR^2 - iRr\cos\theta) \\ \rho^3 &= (R^2 + r^2 + z^2 - 2rR\cos\theta)^{3/2} \end{aligned} \tag{4}$$

Ecuaciones que al incluirlas en la ecuación (1), permiten deducir las expresiones siguientes para las componentes rectangulares del campo magnético:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rz\cos\theta d\theta}{R^2 + r^2 + z^2 - 2rR\cos\theta} = B_r \\ B_y &= -\frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rz\sin\theta d\theta}{R^2 + r^2 + z^2 - 2rR\cos\theta} = 0 \\ B_z &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R^2 - rR\cos\theta}{R^2 + r^2 + z^2 - 2rR\cos\theta} d\theta \end{aligned} \tag{5}$$

La integral para  $B_y$  es elemental y da cero, valor que igualmente puede deducirse de la simetría de la espi-

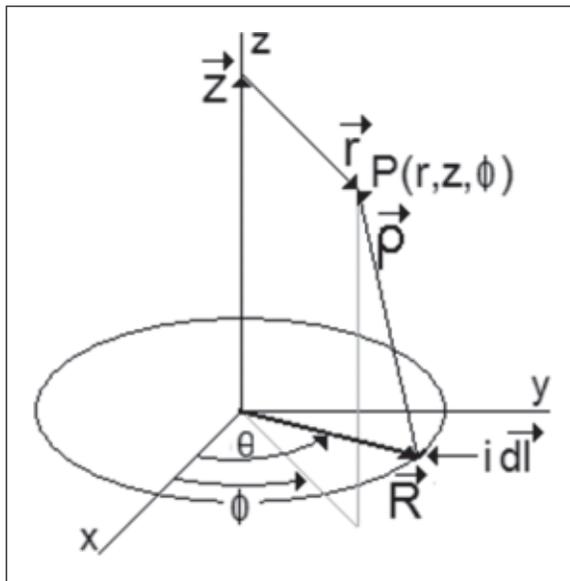


Figura 4. Espira de radio R por la cual circula una corriente i en sentido positivo y coordenadas para el cálculo del campo magnético en el punto P.

Haciendo uso de los vectores unitarios polares  $(\hat{R}, \hat{\theta})$ , cilíndricos  $(\hat{r}, \hat{z}, \hat{\phi})$  y rectangulares  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ , y para facilitar los cálculos, ubicando el punto P en el plano xz, ( $\phi = 0$ ) se obtiene

ra. Las integrales de las otras 2 componentes, axial  $B_z$  y radial  $B_r$ , no tienen soluciones analíticas sencillas; se evaluaron numéricamente usando MatLab y se han representado en la figura 5, para 2 espiras de 2.0 y 5.0 cm de diámetro. Las intensidades de campo magnético pueden ser obtenidas multiplicando los valores de las integrales por las cantidades  $\frac{\mu_0 i}{4\pi}$ , con una intensidad de corriente negativa para la espira interna y positiva para la espira externa, y sumando luego los valores obtenidos. Los valores de las corrientes y los

radios de las espiras, pueden ser ajustados para lograr la mejor coincidencia entre las figuras, pero no se hizo tal ajuste.

Puede observarse una gran coincidencia entre las figuras: 2 y 3 con la figura 5, lo que permite afirmar que los campos magnéticos de magnetrones que tengan una simetría axial, pueden simularse con los campos generados por espiras con corrientes, siendo los radios y las intensidades de las corrientes, los parámetros que

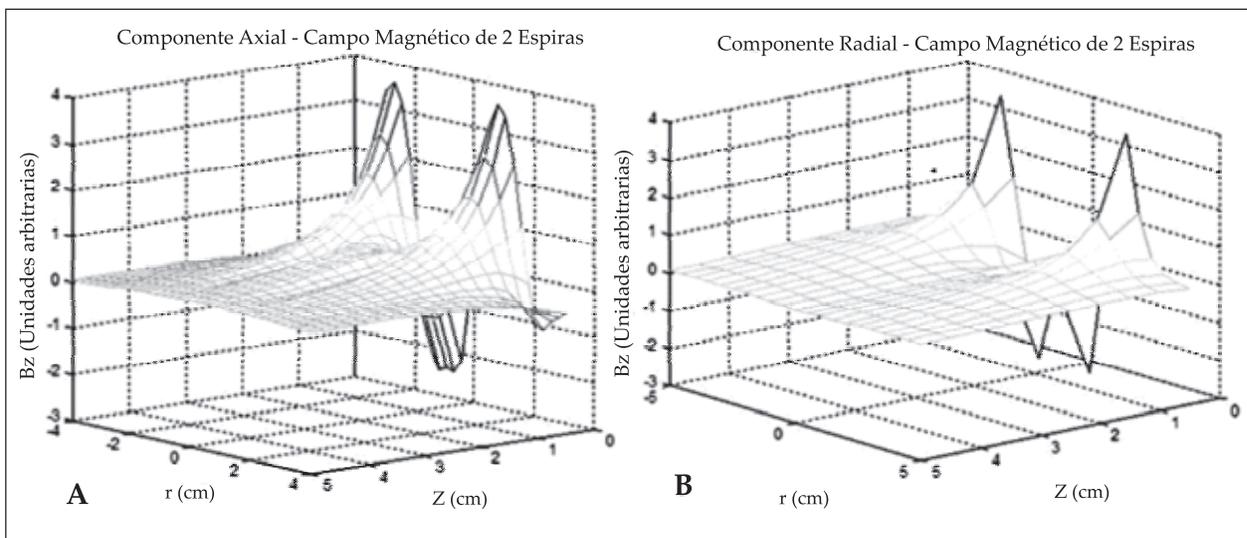


Figura 5. Resta entre las integrales correspondientes a las componentes axiales, (figura A) y radiales (figura B), de los campos magnéticos generados por 2 espiras.

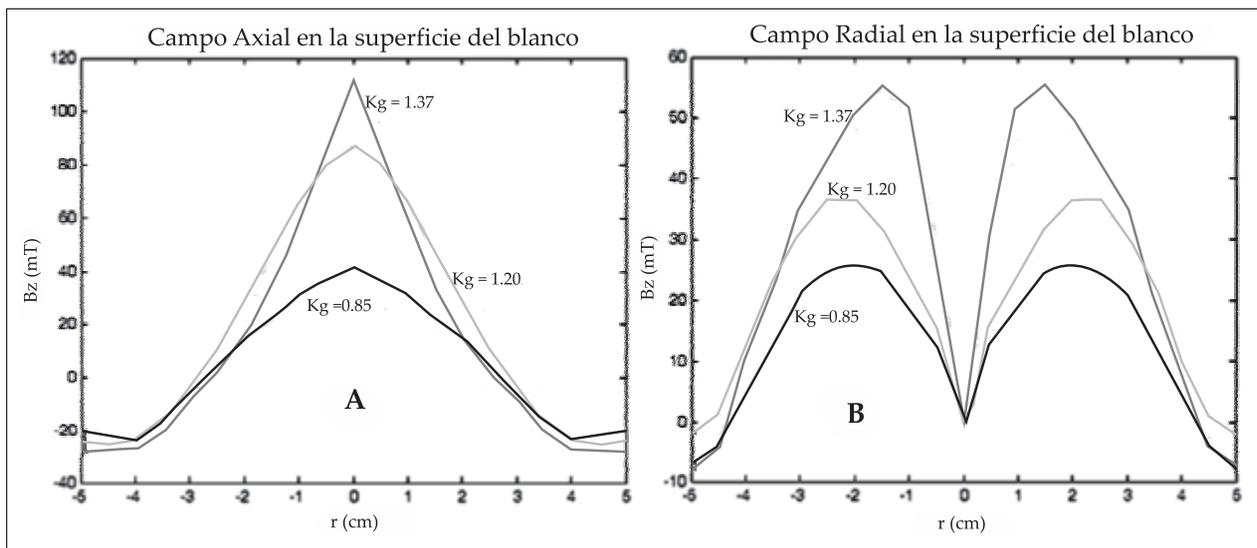


Figura 6. Componentes axial A y radial B en la superficie del blanco con 3 grados de desbalance  $K_G$

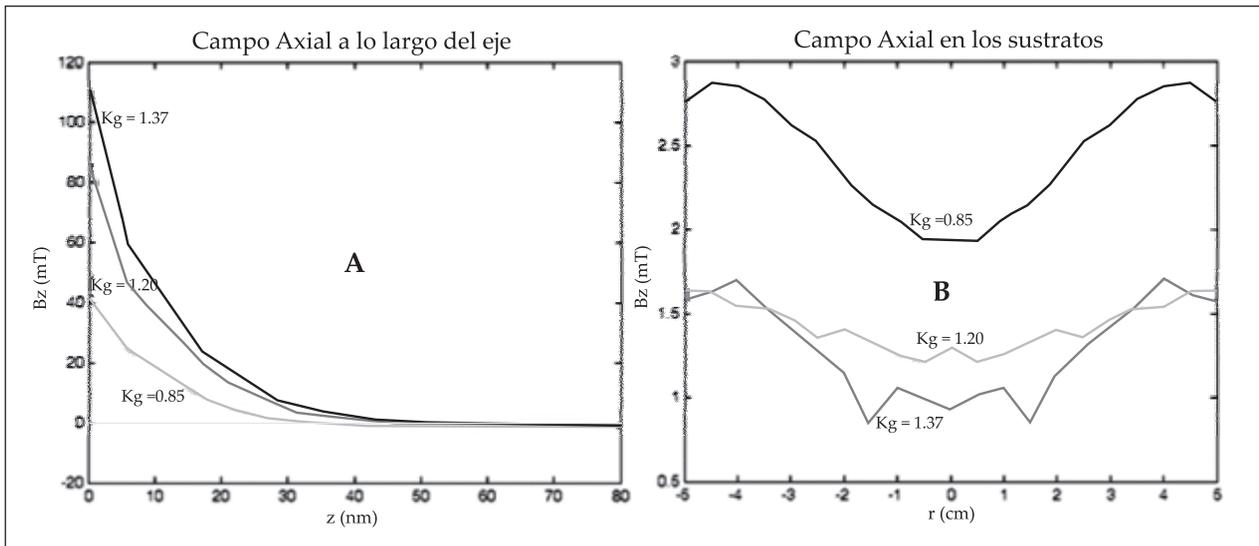


Figura 7. Componente axial a lo largo del eje A y en la posición del sustrato B con 3 grados de desbalance  $K_g$

pueden ajustarse para lograr coincidencia entre los mismos. Tanto la componente axial como la radial son prácticamente constantes y de baja intensidad para distancias superiores a unos 4 cm.

El grado de desbalance del campo magnético se cuantifica mediante su coeficiente geométrico  $K_g$ , (Marulanda *et al.*, 2011; svadkovski *et al.*, 2003) y el efecto de su variación puede verse en las figuras 6 y 7 ( $K_g = 0.85$  para máximo desbalance y  $K_g = 1.37$  para mínimo desbalance del magnetron Gencoa VT 100). Aunque las componentes axial y radial disminuyen en la superficie del blanco con el incremento en el desbalance, (figura 6) en el sustrato la componente axial se ve incrementada, (figura 7B) aumentando la densidad de iones que llegan a la película en crecimiento. En la figura 7A puede verse un rápido decrecimiento de la componente axial a lo largo del eje del magnetron, a medida que se aleja del sustrato.

## Conclusiones

Se midieron las componentes axial y radial de los campos magnéticos generados por magnetrones con simetría axial: un Gencoa VT 100 y otro formado por un imán cilíndrico en el centro de un imán anular; se representaron en 3D en las figuras 2 y 3. Se demostró que estos campos magnéticos pueden ser simulados y practicamente coinciden, con el campo generado por 2 espiras coplanares y concéntricas, por las que cir-

culan corrientes en sentidos opuestos. La componente axial presenta un máximo negativo en el centro y 2 máximos positivos simétricos que decaen rápidamente a medida que se aleja del magnetron, llegando a ser practicamente constante y de baja intensidad para distancias superiores a unos 4 cm. La componente radial tiene 2 máximos negativos simétricos y 2 máximos positivos, que igualmente decaen rápidamente al alejarse del magnetron. Con el aumento en el desbalance del campo magnético se disminuye la intensidad del campo magnético en la superficie del blanco, pero se incrementa la componente axial del mismo en la posición de los sustratos.

## Bibliografía

- Biederman H. et al. 1999, Characterization of an unbalanced magnetron for composite film (metal/C:H), *Vacuum* 52: 415-420.
- Bunshah Rointan F. 2001, HANDBOOK OF HARD COATINGS Deposition Technologies, Properties and Applications, Noyes Publications, New Jersey USA.
- Han L., Zhao Y. Q., Wang Y. W., 2009, A new semi-analytical method analyzing the magnetic field in unbalanced magnetron sputtering system, *Vacuum* 83: 1317-1320.
- Ikuta H. et al. 2009, Development of a magnetron sputtering system with an extraordinary strong magnetic field near the target, *Vacuum* 83: 475-478.
- Kelly P.J., Arnell R.D. 1998, The influence of magnetron configuration on ion current density and deposition rate in a dual unbalanced magnetron sputtering system, *Surface and Coatings Technology* 108-109: 317-322.
- Kelly P.J., Arnell R.D. 2000, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, *Vacuum* 56: 159-172.

- Klevets N. I. 2006 Optimal design of magnetic systems, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **306**: 281–291.
- Komath M., Mohan G. R., Mohan S. 1999, Studies on the optimization of unbalanced magnetron sputtering, *Vacuum* **52**: 307- 311.
- Marulanda D. M., Olaya J. J., Piratoba U., Mariño A. Camps E. 2011, The effect of bilayer period and degree of unbalancing on magnetron sputtered Cr/CrN nano-multilayer wear and corrosion *Thin Solid Films* **519**, 1886-1893.
- Mattox Donald M. 1998 *HANDBOOK OF PHYSICAL VAPOR DEPOSITION (PVD) PROCESSING*, Noyes Publications, New Jersey USA.
- Olaya J. J. *et al.* 2007, The influence of the magnetic field configuration on plasma parameters and microstructure of niobium nitride films, *Surface & Coatings Technology* **201**: 6117-6121.
- Olaya J. J., Piratoba U. and Rodil S. E., 2011, Resistencia a la corrosión de recubrimientos de CrN depositados por PVD con UBM: Tecnología eficiente y ambientalmente limpia, *Rev. Lat. de Met. y Mat.* **31** (1): 44-51.
- Svadkovski, I.V Golosov D.A., Zavatskiy S.M., 2003 Characterization parameters for unbalanced magnetron sputtering systems, *Vacuum* **68**: 283–290.

Recibido: Enero 19 de 2012.

Aceptado para su publicación: Marzo 2 de 2012.

# EFFECTIVIDAD DE LA SANIDAD DE CORMOS DE PLÁTANO DOMINICO HARTÓN (*MUSA AAB SIMMONDS*), SOBRE NEMATODOS FITOPARÁSITOS Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Óscar Adrián Guzmán Piedrahita\*, Jairo Castaño Zapata\*\*,  
Bernardo Villegas estrada\*\*\*

## Resumen

**Guzmán Piedrahita, O. A.; J. Castaño Zapata; B. Villegas estrada:** Efectividad de la sanidad de cormos de plátano Dominico Hartón (*Musa AAB Simmonds*), sobre nematodos fitoparásitos y rendimiento del cultivo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (138): 45-55, 2012. ISSN 0370-3908.

El objetivo fue evaluar la efectividad de varias prácticas sanitarias aplicadas a cormos de plátano Dominico Hartón, sobre nematodos fitoparásitos y rendimiento. En la granja Montelindo de la Universidad de Caldas, se asignaron tres tratamientos, cada uno con cinco repeticiones, en un diseño experimental de bloques completos al azar, así: 1) Cormos con limpieza sanitaria "pelado" + carbofuran + gallinaza + *Paecilomyces lilacinus*; 2) Cormos tradicionales + 2 kg de gallinaza y 3) Cormos tradicionales sin gallinaza. Las plantas del primer tratamiento tuvieron mayor peso de racimo con 18,6 kg y 3% de plantas caídas, prevaleciendo el fitonematodo *Meloidogyne*, siendo estadísticamente diferentes a las del segundo y tercer tratamiento que tuvieron peso de racimo de 13,6 y 13,3 kg, respectivamente, con 25 y 39% de plantas caídas, respectivamente, predominando *Radopholus similis*.

**Palabras clave:** *Radopholus similis*, *Meloidogyne* spp., limpieza sanitaria.

## ABSTRACT

The objective was to evaluate the effectiveness of various sanitary practices applied to corms of Dominico Hartón plantain, on plant parasitic nematodes and yield. At the Montelindo farm of the Universidad de Caldas, three treatments in a complete block design were assigned, with five replications per treatment. The treatments were: 1) Corms with sanitary cleanliness "peeled" + carbofuran + chicken manure + *Paecilomyces lilacinus*, 2) Traditional corms + 2 kg of chicken manure, and 3) Traditional corms without chicken manure. The plants from corms with sanitation had the highest bunches' weight with 18.6 kg and 3% of dropped plants, prevailing *Meloidogyne*, being statistically different from that obtained of

\* M.Sc. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Programa de Maestría en Fitopatología. Email: oscar.guzman@ucaldas.edu.co,

\*\* Ph.D. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Programa de Maestría en Fitopatología. Email: jairo.castano\_z@ucaldas.edu.co,

\*\*\* M.Sc. Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Programa de Maestría en Fitopatología. Email: bernardo.villegas@ucaldas.edu.co

traditional corms with and without chicken manure, which had a weight of 13.6 and 13.3 kg, respectively, besides 25 and 39% of dropped plants, respectively, prevailing *Radopholus similis*.

**Key words:** *Radopholus similis*, *Meloidogyne* spp., sanitary cleanness.

## Introducción

En Colombia, hay sembradas aproximadamente 348.510 ha en el cultivo del plátano con una producción de 2.247.487 t, convirtiéndose en un producto de gran importancia socioeconómica en el sector tradicional de economía campesina, generando 0,75 empleos ha año<sup>-1</sup>, que corresponden a 261.383 empleos permanentes anualmente (Rodríguez & Rodríguez, 2001; espinel *et al.*, 2006; Agronet, 2009). El plátano ha sido utilizado fundamentalmente como sombrío del café, participando con el 6,8% del total de la producción agrícola nacional y ocupa el quinto lugar después del café, caña de azúcar, banano y flores (espinel *et al.*, 2006).

Dado que la reproducción de las musáceas se realiza mediante propagación vegetativa (cormos, rizomas o hijuelos) existen muchos problemas fitosanitarios como los nematodos fitoparásitos que son limitantes para el normal desarrollo del cultivo (Aguas & Martínez, 2003; Coyne *et al.*, 2005; tenkouano *et al.*, 2006; Díaz *et al.*, 2007; Hauser, 2007). Las principales estrategias de manejo de los nematodos fitoparásitos en musáceas están determinadas por varios factores agronómicos como son: evitar ingresar al campo antes de establecer un cultivo, promover la sanidad y el vigor de las raíces de las plantas, reducir o evitar que penetren a las raíces y cormos, y mantener el material de siembra libre de plagas y enfermedades (Loos & Loos; 1960; Blake, 1961; Daneel *et al.*, 1998; Robinson *et al.*, 1998; Sarah, 2000; Guzmán & Castaño-Zapata; 2004; Araya, 2003; Gowen *et al.*, 2005; Price, 2006; Hauser, 2007).

Existen varias prácticas para el manejo de nematodos en semillas de plátano como la sumersión de cormos en agua caliente a 52°C 20 min<sup>-1</sup> (Colbran, 1967), el tratamiento de los cormos con pelado sanitario que consiste en la eliminación de las raíces, remoción de aproximadamente 5 mm de la capa más externa del cormo y todo el tejido necrótico e inmersión en agua hirviendo por 30 seg a 100°C (Hauser, 2007; Tenkouano *et al.*, 2006); al igual que el tratamiento químico de los cormos con productos de acción nematicida e insecticida como el oxamilo (Vydate®) en dosis de 1,3

mL de p.c./L de agua por un tiempo mínimo de 20 min (Díaz *et al.*, 2007).

Debido a que las semillas de higuera (*Ricinus communis* L.) son tóxicas por la presencia de metabolitos secundarios como albúminas, ricina y alcaloides, y ricinina, se utiliza como nematicida e insecticida para el control de plagas en diversos cultivos (topping *et al.*, 1982; Moshkin, 1986; Holfelder *et al.*, 1998; Acacio-Bigi *et al.*, 1998; Corpoica, 2008).

Los compuestos tóxicos, alcaloides, fenoles, terpenoides, entre otros, y las lectinas, tales como la ricina y la ricinus-aglutinina, son tóxicos a los nematodos fitoparásitos como los formadores de nudos o agallas en el sistema radical (*Meloidogyne* spp. Goeldi), debido a su capacidad de adherirse fuertemente a los anfidios y modificar así su comportamiento quimiotáctico (Marbán *et al.*, 1987; Rich *et al.*, 1989). Rodríguez (2005), encontró que la torta deshidratada de higuera incorporada al suelo en concentraciones de 1,5, 2,0 y 3,0% en plántulas de café de 60 días de edad, redujo las poblaciones de *Pratylenchus coffeae* Sher & Allen en 61, 70 y 76%, respectivamente; mientras que carbofuran disminuyó la población en 54%, con relación al testigo. Así mismo, encontró que la higuera afecta a otros fitonematodos como *Aphelenchus avenae* Bastian, *Hoplolaimus indicus* Sher, *Pratylenchus delattrei* Luc, *Tylenchorhynchus brassicae* Cobb, *Helicotylenchus dihystera* (Cobb) Sher., y *Rotylenchus reniformis* Lindford & Oliveira.

En Colombia, la mayoría de cultivos de plátano Dominicano Hartón son establecidos tradicionalmente con cormos sin tratar provenientes del mismo cultivo. Consecuentemente, los cormos usados llevan consigo nematodos y otros patógenos y plagas habitantes del suelo, resultando en la contaminación de los cultivos nuevos. Debido a que uno de los métodos más sencillo y económico para el manejo de los nematodos fitoparásitos consiste en realizar limpieza sanitaria de los cormos "pelado" para remover el tejido lesionado, el objetivo de éste trabajo fue evaluar el efecto de varias prácticas sanitarias aplicadas a los cormos de plátano Dominicano Hartón, sobre el rendimiento y la cantidad de nematodos fitoparásitos.

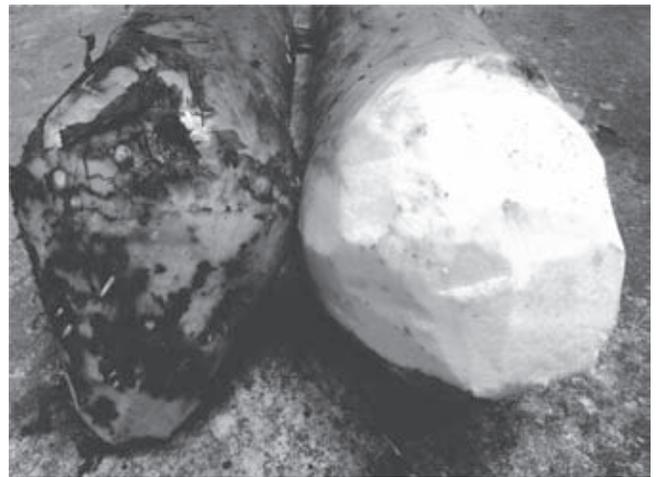
## Materiales y métodos

La investigación se realizó en la granja Montelindo de la Universidad de Caldas, ubicada en la vereda Santagueda del municipio de Palestina, Caldas, Colombia, a 5° 05'N y 75° 40'W, altitud de 1050 msnm, temperatura media de 22,5°C, humedad relativa del 76%, precipitación anual de 2100mm y brillo solar anual de 2010 h. El suelo es originado a partir de cenizas volcánicas andesíticas de grano fino, clasificado como Tipic dystrandept con buena fertilidad natural y textura franco arenosa (salazar & Duque, 1994). Al momento del establecimiento del experimento, al suelo se le determinó la cantidad inicial de nematodos fitoparásitos, cuyo procedimiento se describe adelante. Los cormos de plátano fueron sembrados a 3m entre surcos y 1m entre plantas, en las calles de un lote de higerilla con las variedades Nordesteña y Energía. La higerilla estuvo asociada con las plantas de plátano hasta los 10 meses después de la siembra.

El material vegetal utilizado fue cormos de plátano Dominico Hartón con un peso promedio de 1.400g, de ellos se utilizaron dos tipos de cormos: el tradicional a los cuales se les retiraban las raíces solamente, y con limpieza sanitaria "pelado" (Figura 1).

La limpieza sanitaria consistió en hacer cortes "pelado" con un cuchillo del tejido necrótico de los cormos afectados por nematodos fitoparásitos y picudos para eliminarlos, de tal manera que se obtenían cormos de color crema claro (Figura 1). La realización de cortes de tejido necrosado al cormo también permitía la eliminación de tejido sano que funciona como fuente de nutrimentos. La práctica de limpieza sanitaria, en algunos cormos, se realizó máximo hasta 5cm antes de la zona donde se forman las raíces (región estelar central "mangin"). Los cormos que tenían daño severo y que además, involucraba profundizar hasta la región de mangin fueron desechados. Después de realizar ésta práctica, los cormos quedaron con un peso promedio de 800g, lo que indica que el tejido eliminado fue de 43%.

La limpieza sanitaria se realizó sobre una mesa construida con guadua y esterilla a 1m de altura del suelo, para permitir realizar los cortes y que el tejido contaminado cayera al suelo; así mismo, los cormos tratados fueron colocados en la misma mesa para evitar que el contacto con partículas de suelo o raíces los volviera a infectar. Para conocer la cantidad inicial de nematodos de los remanentes del pelado, se recolectaron 2



**Figura 1.** Cormo de plátano Dominico Hartón sin limpieza sanitaria parasitado por *Radopholus similis* (izquierda) y con limpieza sanitaria "pelado" (derecha).

kg de suelo y raíces en bolsas de plástico debidamente identificadas y se trasladaron al laboratorio de Fitopatología del departamento de Producción Agropecuaria de la Universidad de Caldas, donde se realizó la extracción de los nematodos basados en el principio de flotación de los nematodos en azúcar (Meredith, 1973; Araya et al., 1995) como se describe a continuación:

El procedimiento se realizó de la siguiente manera: las raíces se lavaron con agua corriente, después de dejarlas secar a temperatura ambiente, se pesaron 30 g de ellas en una balanza Analytical Plus, marca Ohaus, y con la ayuda de tijeras se cortaron transversalmente trozos de raíces de 1 cm, que luego se homogenizaron. Estos trozos se colocaron dentro del vaso de una licuadora Osterizer®, modelo 565-15, conteniendo 300 mL de agua y luego se licuaron dos veces a alta velocidad por 15 seg. La solución del licuado fue depositada en un tamiz de 250  $\mu$ m, el cual estaba colocado sobre un tamiz de 106  $\mu$ m, y éste sobre otro de 25  $\mu$ m. La muestra se lavó con agua a presión para que hubiera desprendimiento de los nematodos, y del material que quedaba en el tamiz de 25  $\mu$ m, luego se depositó todo su contenido en tubos de centrifugación de 30 mL de capacidad. Posteriormente, se centrifugó a 3.800 rpm durante 5 min.

Como consecuencia de la centrifugación hubo sedimentación de las partículas pesadas en el fondo del tubo y se procedió a eliminar el sobrenadante. Seguidamente, los tubos fueron llenados nuevamente con

solución de sacarosa al 50% y sometidos a centrifugación a 3.800 rpm durante 5 min con el propósito de que los nematodos quedaran flotando en la solución de sacarosa por densidad diferencial y fueran separados de las partículas más pesadas. Luego el sobrenadante se depositó en el tamiz de 25  $\mu\text{m}$  para lavar la sacarosa con agua corriente a presión baja y evitar que los nematodos fueran afectados por ésta. Finalmente se recogieron 20 mL de agua con nematodos en una caja de Petri.

La identificación de los nematodos fitoparásitos se realizó con base en las ilustraciones de **Guzmán & Castaño-Zapata** (2004) y las claves taxonómicas de **Thorne** (1961), **Maggenti et al.** (1987), **Mai et al.** (1996) y **Siddiqi** (2000).

Para conocer el efecto de la limpieza sanitaria de los cormos “pelado” sobre el rendimiento del plátano Dominicano Hartón (*Musa AAB*) asociado con higuierilla (*R. communis*) y su relación con los nematodos fitoparásitos, se utilizaron 405 cormos; cada uno como unidad experimental. El experimento se estableció el 28 de abril de 2010 y estuvo conformado de tres tratamientos, cada uno en total con 135 cormos, sembrados en hoyos de 20X20X30cm de largo, ancho y profundo, respectivamente, y distribuidos al azar en cinco parcelas de 27 plantas (tres surcos, cada uno con nueve plantas), a una distancia de 3 X 2,5m y con bordes de Dominicano Hartón a igual distancia.

Los tratamientos fueron: 1) Cormos con limpieza sanitaria “pelado” a los cuales se les realizó sumersión en solución de carbofuran al 1% (Furadan® 3SC) durante 1h. Ocho días antes de la siembra se incorporó por sitio, 2kg de gallinaza, y el día de la siembra, con una aspersora de espalda de 20L de capacidad, se aplicó alrededor de cada sitio 50mL de una suspensión de *Paecilomyces lilacinus* (Paecilotrónico®, dosis de 4g.L<sup>-1</sup> de agua); 2) Cormos tradicionales sembrados en hoyos con 2kg de gallinaza; 3) Cormos tradicionales sembrados en hoyos sin gallinaza.

Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar con tres tratamientos, cinco repeticiones por tratamiento, cada una con 27 unidades experimentales.

Durante el primer año del experimento se realizaron tres fertilizaciones: la primera, se realizó el 26 de mayo (28 días después de la siembra, DDS) con Rafos®, abocol (12-24-12-2; N, P, K y Ca, respectivamente) y ese mismo día se realizó la segunda aplicación de *P.*

*lilacinus* (Paecilotrónico®, dosis de 4g.L<sup>-1</sup>) a las plántulas provenientes de los cormos con limpieza sanitaria; la segunda, se efectuó el 14 de julio (106 DDS) con Agrocafé® (17-6-18-2; N, P, K y Mg, respectivamente); y la tercera, se hizo el 20 de octubre (202 DDS), con Agrocafé®. En la primera y segunda fertilización, se aplicaron 100g por planta, y en la tercera fertilización 150g.

Se realizó deshoje sanitario y desyerbas manuales en el plato de las plantas al momento de cada fertilización; igualmente se hizo deshiera con guadaña cada 4 meses en las calles.

La evaluación del daño ocasionado por los nematodos fitoparásitos a las raíces, se realizó utilizando los diagramas de severidad establecidos por **Carlier et al.** (2003). Se realizaron dos muestreos destructivos: el primero, fue un muestreo destructivo de cinco plantas por tratamiento y repetición a las 12 semanas después de los tratamientos; y el segundo, a los 20 días después de la floración “belloteo” (aproximadamente a los 12 meses después de la siembra). Éste último consistió en recolectar las raíces a través de una excavación estándar de 20 x 20 x 20cm la cual se extendía desde el corno de la planta madre.

Posteriormente, se dividieron las raíces recolectadas en dos categorías: raíces muertas (RM), y raíces funcionales (RF), y se contaba la cantidad de raíces en cada categoría. Luego, se seleccionaron al azar cinco raíces primarias funcionales, de mínimo 10cm de largo, después se observó la condición sanitaria general de las raíces secundarias y terciarias o raíces alimentadoras. Luego, se redujo el largo de las cinco raíces funcionales seleccionadas a 10cm y se les hicieron cortes longitudinales en rebanadas.

La evaluación de la severidad consistió en marcar la mitad de cada una de las cinco raíces respecto al porcentaje de corteza radical con necrosis. El máximo de necrosis radical para la mitad de las raíces podía ser de 20%, y por ende la necrosis radical máxima sería de 100% para las cinco mitades de raíces juntas. Posteriormente, se registró la necrosis de cada raíz (NR1 a NR5) y la sumatoria fue la necrosis radical total de la muestra (NRT). Con este dato, se calculó la tasa de desarrollo (*r*) del daño causado por los nematodos fitoparásitos empleando la siguiente fórmula:

$$r = \frac{1}{t_0 - t_1} \left( \text{Log N} \frac{X_1}{1 - X_1} - \text{Log N} \frac{X_0}{1 - X_0} \right)$$

Dónde:  $r$  = Tasa de desarrollo de la enfermedad,  $t_0$  = Tiempo inicial,  $t_1$  = Tiempo final,  $X_0$  = Severidad inicial y  $X_1$  = Severidad final (Castaño-Zapata, 2002).

Las variables de respuesta fueron peso de racimo (kg), al igual que la cantidad y géneros de nematodos fitoparásitos en 100g de suelo y de raíces; las variables complementarias fueron el porcentaje de brotación (plántulas efectivas/cormos sembrados), volcamiento (número de plantas caídas a cosecha), y tiempo (meses) a floración y cosecha.

Para el análisis de los datos, se determinaron los promedios y coeficiente de variación para la variable de respuesta y para las complementarias; además se realizó análisis de varianza al 5% de probabilidad para las variables evaluadas de acuerdo con el diseño en bloques completos al azar. Así mismo, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey al 5% para establecer la diferencia entre los promedios de los tratamientos, utilizando el programa estadístico SAS, versión 9,0.

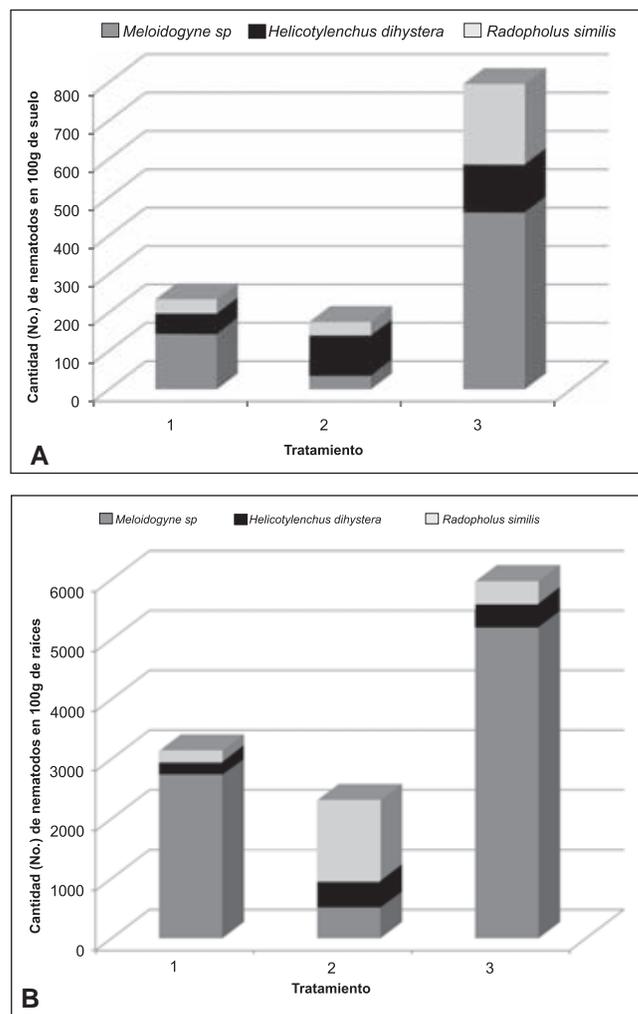
## Resultados y discusión

**Brotación (%).** Se obtuvo una excelente brotación de los cormos en todos los tratamientos, la cual osciló entre 90 y 100%. Esta última se obtuvo en los cormos con limpieza sanitaria “pelado” tratados con carbofuran, y asociados con gallinaza y *P. lilacinus*.

**Población inicial de nematodos fitoparásitos en suelo y raíces.** En el suelo donde se estableció el experimento se encontraron 503 nematodos del género *Helicotylenchus*, 366 de *Pratylenchus* y 366 de *Meloidogyne*, con base en 100g de suelo. En las raíces de la higuera se encontraron 94 individuos de *Helicotylenchus*, 17 de *Pratylenchus* y 9 de *Meloidogyne*, también en 100g. Estos resultados indicaron que en éste lote no se encontraba el nematodo Barrenador, *R. similis* que es la principal especie fitoparásita de las musáceas. Según Sarah et al. (1996) y Gowen et al. (2005), *R. similis* no se encuentra en suelos sin uso agrícola o vírgenes, por consiguiente, se debe evitar su ingreso a ellos antes de la siembra; y para lograrlo, es esencial utilizar material de siembra libre de fitonematodos.

**Población de nematodos fitoparásitos después de los tratamientos.** A las 12 semanas de sembrados los cormos, se encontró que los tratamientos con la canti-

dad menor de nematodos fitoparásitos se obtuvo de los cormos provenientes de limpieza “sanitaria” y en cormos tradicionales asociados con gallinaza; obteniéndose valores mayores en raíces que en suelo (Figura 2). En el primer tratamiento, predominó *Meloidogyne* con valores entre 144 y 2.740 nematodos/ 100g de suelo y raíces, respectivamente, y en el segundo, predominó el género *R. similis* con 1.363 nematodos/100g de raíces, indicando que la mayor cantidad de este nematodo provenía de la semilla tradicional contaminada. Los cormos tradicionales sembrados sin gallinaza tuvieron las mayores cantidades de fitonematodos, destacándose *Meloidogyne* con 5.197 nematodos, *R. similis* y *Helicotylenchus* con 385 nematodos/100g de raíces (Figura 2).



**Figura 2.** Cantidad de nematodos fitoparásitos a las 12 semanas después de la siembra. A. Suelo. B. Raíces. 1. Cormos con limpieza sanitaria + carbofuran + gallinaza + *Paecilomyces lilacinus*. 2. Cormos tradicionales + gallinaza. 3. Cormos tradicionales sin gallinaza.

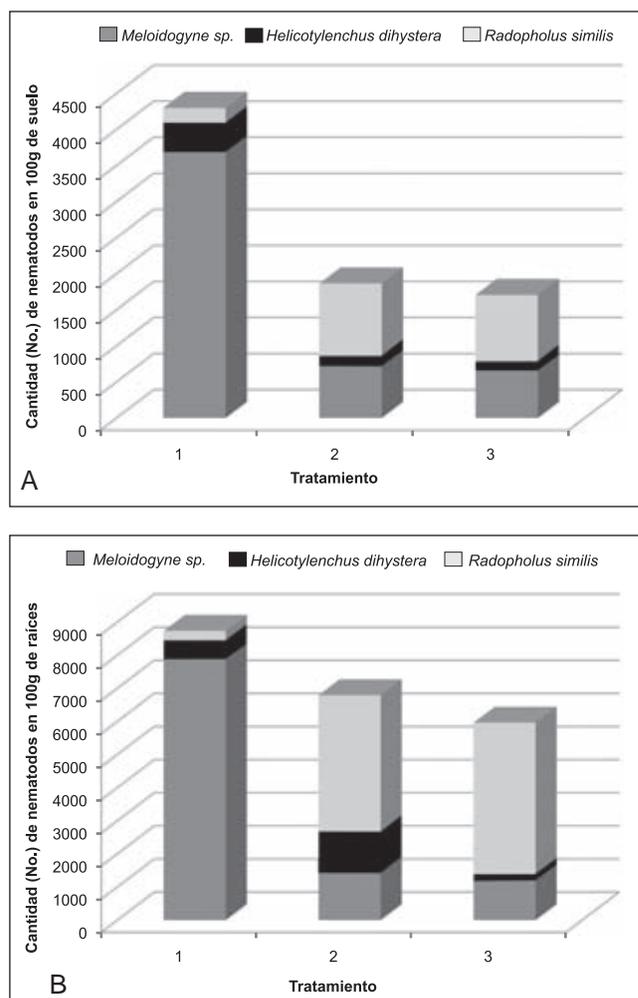
Estos resultados confirman lo encontrado **Loos** (1962), **Blake** (1969), **sarah et al.** (1996), **Gowen et al.** (2005), ya que como el banano y el plátano han sido tradicionalmente propagados por semilla asexual mediante colinos “cormos” o cepas “rizomas”, y a que *R. similis* se caracteriza por ingresar y movilizarse dentro de las células de raíces y los cormos, esto ha permitido que el intercambio de material de siembra infectado sea el principal medio de su diseminación.

En floración, nuevamente se encontró que las plantas provenientes de cormos con limpieza sanitaria + carbofuran + gallinaza + *P. lilacinus*, tenían las cantidades mayores de nematodos fitoparásitos, destacándose el género *Meloidogyne* con valores de 3.684 y 7.888/100g de raíces y suelo, respectivamente (Figura 3). Esto posiblemente ocurrió debido a que ante la cantidad menor de *R. similis* que barrena las células y compite por espacio, facilitó la colonización de *Meloidogyne*, tal como lo indican **Moens** (2004) y **torrado & Castaño-Zapata** (2009), quienes observaron un efecto supresor entre estos dos géneros en las raíces de *Musa* dependiendo de cuál de los dos penetra primero.

Resultados opuestos se encontraron en el suelo y raíces de las plantas provenientes de cormos tradicionales con y sin gallinaza, donde se destacó *R. similis* con un valor promedio de 4.340 nematodos/100g de raíces, siendo 78% superior a la cantidad hallada en el suelo. Los valores de los demás fitonematodos fueron inferiores a los de *R. similis* con valores por debajo de 1.430 nematodos/100g de suelo y raíces (Figura 3). Esto también posiblemente ocurrió debido a la cantidad mayor de *R. similis* dentro de los cormos y raíces de plátano, el cual barrena las células y compite por espacio, impidió la colonización de *Meloidogyne*, tal como se indicó previamente.

Al momento de realizar los muestreos destructivos, se encontró que a las 12 semanas todas las raíces de las plantas provenientes de cormos con limpieza sanitaria + carbofuran + gallinaza + *Paecilomyces lilacinus* eran funcionales, mientras que las raíces de las plantas provenientes de cormos tradicionales + gallinaza, tenían 24 y 13 raíces funcionales y muertas, respectivamente, muy similar a las de los cormos tradicionales sin gallinaza con 25 y 19, raíces funcionales y muertas, respectivamente.

Al momento de floración, en los cormos con limpieza sanitaria se encontraron 18 raíces funcionales y 3



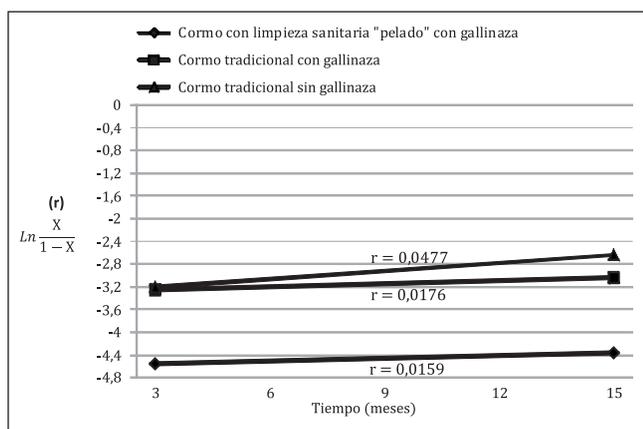
**Figura 3.** Cantidad de nematodos fitoparásitos a floración, 12 meses después de la siembra. A. Suelo. B. Raíces. 1. Cormos con limpieza sanitaria + carbofuran + gallinaza + *Paecilomyces lilacinus*. 2. Cormos tradicionales + gallinaza. 3. Cormos tradicionales sin gallinaza.

mueratas; mientras que en los cormos tradicionales con y sin gallinaza fueron 10 y 4; y 9 y 4, respectivamente; lo que indica que la cantidad mayor de raíces no funcionales ocurrió en los cormos tradicionales, donde se encontraba *R. similis*, el cual al alimentarse de las células del cilindro cortical, modifica la anatomía de las raíces, y reduce la absorción de agua y nutrientes (**Blake**, 1961; **t horne**, 1961; **Fogain & Gowen**, 1997; **Valette et al.**, 1998; **Oramas & Román**, 2006).

No obstante los reportes positivos de varios autores como **Marbán et al.** (1987), **Rich et al.** (1989), **Rodríguez** (2005) y **Arboleda et al.** (2011), acerca del efecto toxico de diferentes tejidos de higuerrilla sobre los nematodos fitoparásitos, en éste estudio no se evi-

denció efecto de la asociación de la higuerrilla con plátano Dominico Hartón en la supresión de nematodos, posiblemente debido a que los compuestos fitotóxicos producidos por la higuerrilla no estaban en cantidad suficiente para afectarlos como ocurre en *in vitro*.

La velocidad a la que se desarrolló el daño de los nematodos fitoparásitos en las raíces fue notablemente superior en los cormos tradicionales sin gallinaza, observándose una tasa de desarrollo de  $r = 0,0477$ , seguida de los cormos tradiciones con gallinaza con  $r = 0,0176$  (Figura 4). Estas tasas fueron muy superiores a la obtenida en los cormos con limpieza sanitaria “pelada” cuyo valor fue de 0,0159, inferior en 0,02 y 0,04, respectivamente (Figura 4).



**Figura 4.** Tasas de desarrollo (r) del daño causado por nematodos fitoparásitos en raíces de plátano Dominico Hartón, de acuerdo con el tratamiento.

**t tiempos a floración y cosecha (meses).** El tiempo desde la siembra hasta la floración y cosecha fue menor en las plantas que provenían de cormos con limpieza sanitaria, inferior en un mes en comparación con las plantas provenientes de cormos tradicionales (Tabla 1). Debido a las poblaciones altas de nematodos, principalmente *R. similis*, en las plantas provenientes de cormos tradicionales, se alargó el ciclo del cultivo. Adicionalmente, hubo alargamiento del ciclo del cultivo en dos meses en las plantas provenientes de cormos con limpieza sanitaria en comparación con la duración del ciclo normal de Dominico Hartón en el mismo sitio experimental, el cual oscila entre 13,5 y 14,7 meses (Aristizábal, 2010), retardo atribuido al sombrío que le proporcionó la higuerrilla al plátano en los primeros meses de crecimiento de las plantas.

**Producción.** Las plantas provenientes de cormos sanos tuvieron un peso promedio de racimo de 18,6 kg y un rendimiento de 23.959 t ha<sup>-1</sup>, superiores en 28,5% y 46,3%, respectivamente, en comparación con las plantas provenientes de cormos tradicionales (Tabla 1). Estos resultados demuestran que las pérdidas ocasionadas por *R. similis* se reflejan en una disminución del peso de los racimos y por consiguiente en un incremento de las pérdidas en el rendimiento, el cual es aumentado por el volcamiento de las plantas. En esta investigación, las parcelas provenientes de cormos tradicionales con y sin gallinaza, tuvieron el menor número de plantas a cosecha con valores de 75% y 61%, respectivamente, por efecto del volcamiento ocasionado por *R. similis*, expresado en menor rendimiento (Tabla 1). La pérdida de anclaje de las plantas ocurre

**tabla 1.** Efecto de la limpieza sanitaria “pelado” asociada con gallinaza sobre la producción de plátano Dominico Hartón (*Musa AAB*).

	Corno con limpieza sanitaria “pelado”		Corno tradicional	
	Con gallinaza + Carbofuran + <i>P. lilacinus</i>	Con gallinaza	Con gallinaza	sin gallinaza
Brotación (%)	100	90	90	90
Tiempo (meses) a floración	12,1	13,0	13,0	13,1
Tiempo (meses) a cosecha	15,0	16,0	16,0	16,1
Plantas a cosecha (%)	97 a*	75 b	75 b	61 b
Plantas caídas (%)	3 a	25 b	25 b	29 b
Peso racimo (kg)	18,6 a	13,6 b	13,6 b	13,3 b
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	23.959 a	13.300 b	13.300 b	12.844 b

\* Dentro de la fila, promedios seguidos con letras diferentes difieren al 5% de probabilidad.

por el deterioro del sistema radical, y puede ocurrir en plantas jóvenes y adultas, pero principalmente entre la época de floración y cosecha, debido al peso del racimo, particularmente durante vientos y lluvias fuertes, lo que causa pérdidas económicas altas (Loos & Loos, 1960; Sarah *et al.*, 1996; Sarah, 2000; Montiel *et al.*, 1997; Araya, 2003; Brooks, 2008).

El mayor peso de racimo obtenido en las plantas provenientes de cormos con limpieza sanitaria se atribuye al efecto del pelado, a través el cual se eliminó el tejido necrótico parasitado por *R. similis*, quien al alimentarse de las células del cilindro cortical, modifican la anatomía de las raíces, interfiriendo con la absorción de agua y nutrientes (Blake, 1961; t horne, 1961; Blake, 1966; Fogain & Gowen, 1997; Valette *et al.*, 1998; Oramas & Román, 2006).

Fogain (2000), en un estudio realizado en Camerún con plátano (*Musa* AAB) cultivar French Sombre, encontró un mayor número de plantas caídas (18,3 y 52,5%, en la primera y segunda cosecha, respectivamente) en áreas infestadas sin tratar con nematocidas, y un menor número de plantas caídas (2,5 y 7,5%, en la primera y segunda cosecha, respectivamente) en las áreas tratadas, lo que representó una disminución en rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ) del 60 y 52% en la primera y segunda cosecha, respectivamente, en comparación con las plantas tratadas.

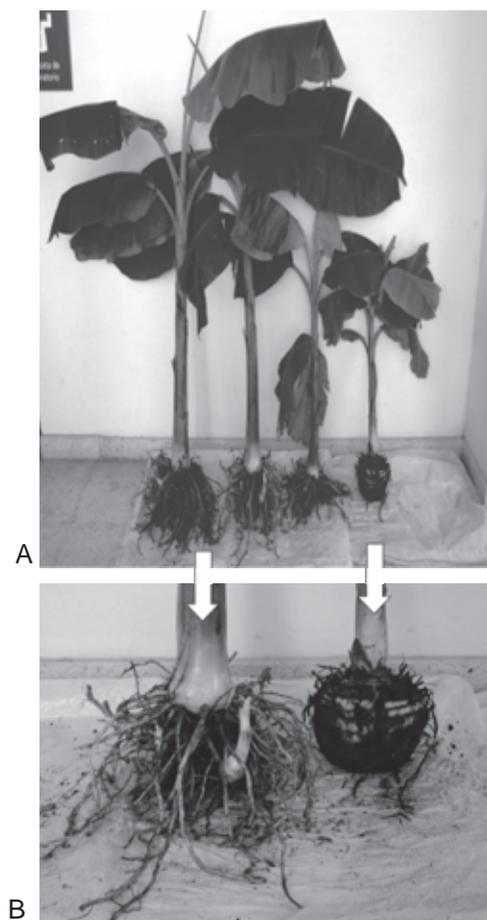
En plantaciones infectadas por *R. similis* con control deficiente, las pérdidas en rendimiento pueden oscilar entre 44 y 50% (Loos & Loos, 1960). En suelos deficientes en nutrientes y erosionados, las pérdidas acumulativas durante tres ciclos de producción pueden alcanzar hasta 75%, debido a la reducción en el peso del racimo y a la caída de las plantas como ha ocurrido en Costa de Marfil (Sarah *et al.*, 1996). En América Central (Costa Rica y Panamá) y en América del Sur (Colombia y Ecuador), las pérdidas causadas por el volcamiento de plantas fluctúan entre 12 y 18%, mientras que en el Valle de Sula en Honduras, éstas tienden a ser menores (alrededor del 5%) (Araya, 2003). Así mismo, el autor principal de esta investigación ha observado en el primer ciclo de producción de Dominico Hartón en la granja Montelindo de la Universidad de Caldas, Colombia, pérdidas del 70% ocasionadas por *R. similis*, principalmente por efecto del volcamiento,

En este estudio se encontró que las plantas provenientes de cormos tradicionales severamente atacados por *R. similis* fueron de menor tamaño y vigor, con hojas

más pequeñas, diferentes a las de las plantas procedentes de cormos sanos (Figura 5). Resultados similares obtuvieron Jenkins & Taylor (1967) y Sarah *et al.* (1996).

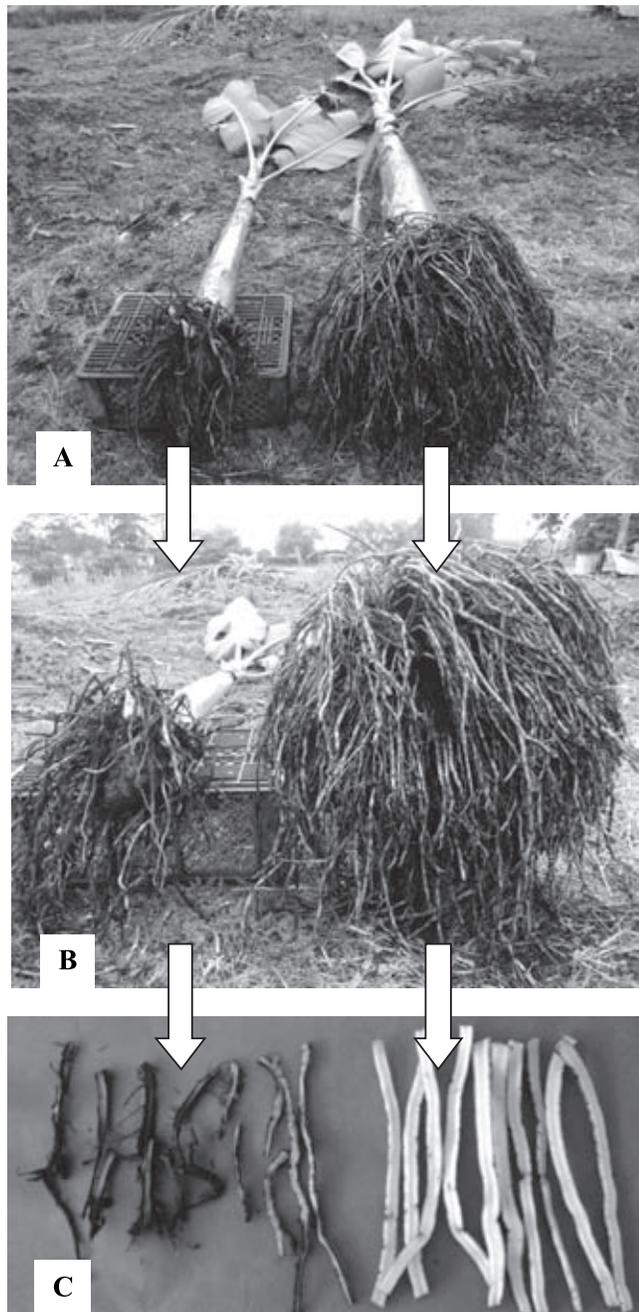
En general, el daño causado por *R. similis*, se reflejó en un menor número y tamaño de las hojas, menor peso del racimo, incremento del tiempo desde siembra a floración, de floración a cosecha, entre floraciones y entre cosechas (Tabla 1, Figuras 5, 6), lo cual coincide con los estudios de Sarah *et al.* (1996), Araya (2003) y Gowen *et al.* (2005).

Finalmente, es importante tener presente que en plantas de la misma edad, se puede apreciar que las severamente atacadas por *R. similis* carecen de raíces absorbentes y las raíces de anclaje son necróticas, de



**Figura 5. A.** Plántulas de plátano Dominico Hartón parasitadas con *Radopholus similis* (derecha) y sanas (izquierda), 12 semanas después de la siembra en condiciones de campo. **B.** Detalle del sistema radical de las mismas plántulas

menor tamaño y cantidad, contrario a lo que ocurre en el sistema radical de plantas libres de éste nematodo (Figuras 5, 6), lo cual concuerda con los resultados obtenidos por otros investigadores como **Loos & Loos** (1960) y **Araya** (2003).



**Figura 6. A.** Plantas de plátano Dominico Hartón con *R. similis* (izquierda) y sin el nematodo (derecha) al momento de floración. **B.** Detalle del sistema radical con *R. similis* (izquierda) y sin el nematodo (derecha). **C.** Cortes transversales de raíces con *R. similis* (izquierda) y sin el nematodo (derecha).

## Conclusiones

La limpieza sanitaria de cormos “pelado” de plátano Dominico Hartón disminuyó al nematodo Barrenador *R. similis* y aumentó el nematodo formador de nudos *Meloidogyne* spp., lo cual redujo el volcamiento y aumentó significativamente el rendimiento del cultivo.

En Colombia, la práctica de limpieza sanitaria de cormos puede ser fácilmente adoptada por los agricultores de plátano y banano, es eficaz para el manejo de plagas como los nematodos fitoparásitos y picudos, económica y no contamina el medio ambiente, convirtiéndose en una estrategia dentro del manejo integrado de éstos problemas sanitarios.

## Bibliografía

- Acacio-Bigi M. J. A., O. C. Hebling., F. C. Bueno. & M. Pagnocca.** 1998. Toxicidade de extratos foliares de *Ricinus communis* L. para operarias de *Atta sexdens rubropilosa* Forel. Rev. Bras. Ent. (Brazil). 41(2-4): 239-243.
- Aguas A. & M. Martinez.** 2003. Técnicas rápidas para la multiplicación de semillas de plátano. Boletines Divulgativos Ecorregión Caribe (COL), (69), 7p.
- AGRONet .** Boletines estadísticos. Encuesta Nacional Agropecuaria. 2009. (Consultado 01 de octubre de 2010). <http://www.agronet.gov.co/agronetweb/Boletines/tabid/75/Default.aspx>
- Araya M., M. Centeno. & W. Carrillo.** 1995. Densidad poblacional y frecuencia de los nematodos parásitos de banano (*Musa* AAA) en nueve cantones de Costa Rica. CORBANA (Costa Rica). 20(43): 6-11.
- Araya M. & t. Moens.** 2003. Parasitic nematodes on *Musa* AAA (Cavendish subgroup cvs 'Grande naine' 'Valery' and 'Williams'). pp: 201-223. En: Turner, D., & Rosales, F. Banana Root System: Toward a Better Understanding for Its Productive Management. San José, Costa Rica, 3-5 November. INIBAP. Montpellier, France.
- Arboleda F., O. Guzmán. & J. Restrepo.** 2010. Efecto *in vitro* de extractos acuosos de higuera (*Ricinus communis* Linneo) sobre el nematodo Barrenador [*Radopholus similis* (Cobb) Thorne]. Revista Agronomía 18 (2): 25 – 36.
- Aristizábal M.** 2010. Efecto de la frecuencia de fertilización con nitrógeno y potasio sobre el crecimiento, producción y severidad de las Sigatocas del plátano (*Musa* AAB) Dominico Hartón. Revista Agronomía 18 (1): 19 – 28.
- Blake C. D.** 1961. Root rot of bananas caused by *Radopholus similis* (Cobb) and its control in New South Wales. Nematologica 6: 295-310.
- Brooks F. e.** 2008. Burrowing Nematode. *The Plant Health Instructor*. APSnet. Obtenido el 15 de agosto de 2011, desde <http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/Nematodes/Pages/Burrowingnematode.aspx>
- Carrier J., D. De Waele. & J.V. escalant.** 2003 Evaluación global de la resistencia de los bananos al marchitamiento por *Fusarium*, enfermedades de las manchas foliares causadas por *Mycosphaerella* y nematodos. Evaluación de comportamien-

- to (A. Vézina y C. Picq, eds). Guías técnicas INIBAP 7. Red Internacional para el Mejoramiento del Banano y el Plátano, Montpellier, Francia.
- Castaño-Zapata J.** 2002. Principios básicos de fitoepidemiología. Manizales: Centro Editorial Universidad de Caldas. 396p.
- Colbran R.C.** 1967. Hot Water Tank for Treatment of Banana Planting Material. Advisory leaflet No. 924. Division of Plant Industry, Queensland.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA.** Centro de investigaciones La Selva. 2008. Higuierilla: Alternativa productiva, energética y agroindustrial para Colombia. 1 ed. Rionegro, Antioquia (Colombia). Centro de Investigaciones La Selva-Corpoica. 38 p.
- Coyne D., C. Kajumba. & F. Kagoda.** 2003. Nematode management at the International Institute of Tropical Agriculture. p.141-148. In: G. Blomme, C. Gold and E. Karamura (eds.), Farmer-Participatory Testing of Banana Integrated Pest Management Options for Sustainable Banana Production in Eastern Africa, Proc. Workshop on Farmer-participatory testing of IPM options for sustainable banana production in Eastern Africa, held in Seeta, Uganda, 8-9 December 2003, INIBAP, Montpellier, France. <http://bananas.bioversityinternational.org/files/files/pdf/publications/farmerparticipatory.pdf>
- Daneel M., K. De Jager. & Z. De Beer.** 1998. IPM for nematodes on bananas in South Africa. pp: 247-257. En: Mobilizing IPM for Sustainable Banana Production in Africa Proceedings of a Workshop on Banana IPM Held in Nelspruit, South Africa — 23-28 November 1998. E.A. Frison, C.S. Gold, E.B. Karamura and R.A. Sikora, editors. INIBAP.
- Díaz M. J., M. Rivera. & L. Durán.** 2007. Como proteger de las plagas del suelo los Cormos-Semilla de Plátano y Banano. 1a ed. La Lima, Cortés, Honduras: FHIA, Departamento de Protección Vegetal. 18 p.
- espinel C., H. Martinez. & Y. Peña.** 2006. La cadena del plátano en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Documento de trabajo N0. 12.
- Fogain R. & s.R. Gowen.** 1997. Damage to roots of *Musa* cultivars by *Radopholus similis* with and without protection of nematicides. *Nematropica* 27(1): 27-32.
- Fogain R.** 2000. Effect of *Radopholus similis* on plant growth and yield of plantain (*Musa* AAB). *Nematology*, 2, 129-133.
- Gowen s., P. Quénéhervé. & R. Fogain.** 2005. Chapter 16: Nematodes parasites of bananas and plantains. pp: 611-643. En: Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture. Edited by: Luc, M., J. Sikora. y J. Bridge. 2005.
- Hauser s.** 2007. Plantain (*Musa* spp. AAB) bunch yield and root health response to combinations of physical, thermal and chemical sucker sanitation measures. *African Plant Protection* 13: 1-15.
- Guzmán P. O. & J. Castaño-Zapata.** 2004. Reconocimiento de nematodos fitopatógenos en Dominico Hartón (*Musa* AAB Simmonds) África, FHIA 20 y FHIA 21 en la granja Montelindo, municipio de palestina (Caldas), Colombia. *Revista colombiana de ciencia*, 38(107) Pp 295-301.
- Holfelder M.G.A., M. steck., e. Komor. & seifert, K.** 1998. Ricinine in phloem sap of *Ricinus communis*. *Phytochemistry*. v.47, n.8, p.1461-1463.
- Jenkins W. R. & D. P. Taylor.** 1967. *Plant nematology*. New York: Reinhold Publ. Corp. 270p.
- Loos C. A. & s. Loos.** 1960. Preparing nematode-free banana "seed". *Phytopathology*. 50. pp: 383-386.
- Loos C. A.** 1962. Studies on the life-history and habits of the burrowing nematode, *Radopholus similis*, the cause of black-head disease of bananas. *Proc. Helminthol. Soc. Wash.*, 29, 43-56.
- Maggenti A., M. Luc., D. Raski., R. Fortuner. & e. Geraert.** 1987. A Reappraisal of Tylenchina (Nemata). 2. Classification of the suborder Tylenchina (Nemata: Diplogasteria). *Revue Nématol.* 10 (2): 135 -142.
- Mai W., P. Mullin., H. Lyon. & K. Loeffler.** 1996. Plant parasitic nematodes. A pictorial key to genera. Fifth edition. Comstock Publishing Associates A Division of Cornell University Press. 277p.
- Marbán n., Jeyaprakash, A., Jansson, H. B., Damon JR. R. A. & Zuckerman, B. M.** 1987. Control of root-knot nematodes on tomato by lectins. *Journal of Nematology* 19:331-335.
- Meredith J.** 1973. Algunos métodos de campo y laboratorio para trabajar con nematodos. Maracaibo (Venezuela). P. 44.pp.
- Moens t., M. Araya., R. swennen. & D. De Waele.** 2004. Enhanced biodegradation of nematicides after repetitive applications and its effect on root and yield parameters in commercial banana plantations. *Bio Fertil Soils* 39: 407-414.
- Moshkin V.A.** 1986. Economic importance and regions of cultivation of castor. In: Moshkin, V. A. Editor. ed. Castor. Moscow. Kolos. p. 1-5.
- Oramas D. & J. Román.** 2006. Histopatología de los nematodos *Radopholus similis*, *Pratylenchus coffeae*, *Rotylenchulus reniformis* y *Meloidogyne incognita* en plátano (*Musa acumulata* X *M. balbisiana*, AAB). *J. Agric. Univ. P.R.* 90 (1-2): 83-97.
- Price n.** 2006. The banana burrowing nematode, *Radopholus similis* (Cobb) Thorne, in the Lake Victoria region of East Africa: its introduction, spread and impact. *Nematology* 8 (6): 801-817.
- Rich, J. R., G. s. Rahi., C.H. Opperman. & e. L. Davis.** 1989. Influence of the castor bean (*Ricinus communis*) lectin (ricin) on motility of *Meloidogyne incognita*. *Nematropica* 19:99-103.
- Robinson J.C., M. Daneel. & P.s. schoeman.** 1998. Cultural practices in relation to integrated pest management in bananas. pp: 283-289. En: Mobilizing IPM for Sustainable Banana Production in Africa Proceedings of a Workshop on Banana IPM Held in Nelspruit, South Africa — 23-28 November 1998. E.A. Frison, C.S. Gold, E.B. Karamura and R.A. Sikora, editors. INIBAP.
- Rodríguez J.L. & A. Rodríguez.** 2001. Aspectos Socioeconómicos del cultivo de plátano en Colombia. En: INFOMUSA. Vol.10. no. 1, p. 4-9.
- Rodríguez C.** 2005. Plantas contra plagas 2 Epazote, hierba de la cucaracha, paraíso, higuierilla y sabadilla. 1 ed. Tlaxcala (México). RAPAL, RAPAM, SOMAS. Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, 209 p.
- salazar H. & s. Duque.** 1994. Manejo cultural y químico de la pudrición acuosa del pseudotallo (*Erwinia chrysantemi* pv. *paradisica*) en *Musa* sp. *Fitopatología Colombiana*. 18 (1): 20-35.
- sarah J. L.** 2000. Burrowing nematode. Pp:295-303. In D.R. Jones ed. Diseases of banana, Abacá and Enset. CABI Publishing. Wallingford, UK.
- sarah J. L., J. Pinochet. & J. stanton.** 1996. El nematodo Barrenador del banano *Radopholus similis* Cobb. Plagas de *Musa* - Hoja Divulgativa No. 1. (Diciembre, 1996). INIBAP, Francia.

- siddiqi M. R.** 2000. Tylenchida: Parasites of plants and insects, 2nd Edition. CABI Bookshop. 834p.
- tenkouano, A., s. HAuse R., D. COYne . & O. COuLIBALe.** 2006. Clean planting materials and management practices for sustained production of banana and plantain in Africa. *Chronica Horticulturae* 46:14–18.
- thorne G.** 1961. Principles of nematology. New Cork, Mc Graw Hill, Book company. 553p.
- topping M. D., t.s. Henderson., C.M. Luczynska. & A. Woodmass.** 1982. Castor bean allergy among workers in the felt industry. *Allergy*, 37, 603-608.
- torrado M. & J. Castaño-Zapata.** 2009. Incidencia de nematodos en plátano en distintos estados fenológicos. *Agronomía Colombiana* 27(2):239-246.
- Valette C., C. Andary., J. P. Geiger., J. L. sarah., & M. nicole.** 1998. Histochemical and cytochemical investigations of phenols in roots of banana infected by the burrowing nematode *Radopholus similis*. *Phytopathology* 88, 1141-1148.

Recibido: Noviembre 28 de 2011.

Aceptado para su publicación: Marzo 2 de 2012.

# HISTORIA GEOLÓGICA DEL BOSQUE HÚMEDO NEOTROPICAL

Carlos Jaramillo\*

## Resumen

**Jaramillo C.:** Historia geológica del bosque húmedo neotropical. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (138): 57-77, 2012. ISSN 0370-3908.

El origen y desarrollo de los bosques bajos neotropicales es aún un misterio. Hoy en día son dominados por angiospermas, las cuales aparecen a principios del Cretácico (~140 Ma). Durante el Cretácico, sin embargo, los bosques tropicales eran dominados por gimnospermas y helechos, no eran multiestratificados, y poseían un bajo potencial fotosintético. La caída de un meteorito hace 65 Ma, transformó las comunidades vegetales neotropicales. Los bosques que se desarrollaron después del evento del meteorito eran multiestratificados, con un dosel dominado por angiospermas y alto potencial fotosintético. El clima tropical ha variado con calentamientos y enfriamientos pronunciados durante los últimos 60 Ma. La diversidad del bosque ha aumentado con los calentamientos, y se ha reducido con los enfriamientos. En los últimos 10 Ma se ha producido la fuerte expansión de las sabanas. El registro fósil sugiere que las plantas modernas ya poseen la variabilidad genética necesaria para responder a incrementos de temperatura y CO<sub>2</sub> en el ambiente.

**Palabras clave:** diversidad, cretácico, cenozoico, bosque tropical

## ABSTRACT

The origin and development of the neotropical rainforest are still a mystery. Angiosperms, which dominate modern forests, originated during the early Cretaceous (~140 Ma). During the Cretaceous, however, the neotropical forest was dominated by gymnosperms and ferns. It was not multi-stratal and had a low photosynthetic potential. The fall of a meteorite 65 Ma ago transformed the neotropics. Forests that evolved after the meteorite event became multistratified. The canopy was dominated by angiosperms and had high photosynthetic potential, similar to modern tropical forests. Over the past 60 m.y., the climate of the tropics has varied greatly, with pronounced global warmings and coolings. Forest diversity increased during the warmings and decreased during the coolings. In the last

\* Smithsonian Tropical Research Institute. Apartado 0843-03092, Balboa, Ancon, Panamá. Email: Panama, jaramillo@si.edu

10 m.y., the savannas have greatly expanded. The fossil record suggests that extant tropical plants already had the genetic variability to cope with high temperatures and CO<sub>2</sub> levels.

**Key words:** Diversity, Cenozoic, Cretaceous, Tropical forests.

## Introducción

El bosque neotropical tiene la mayor cantidad de especies de plantas del planeta, con más de 90.000, y la gran mayoría de ellas (>95%) son angiospermas (**Thomas** 1999). Sin embargo su origen es aún un misterio. Numerosas hipótesis han sido propuestas para explicar su gran diversidad (**Gaston** 2000; **Hoorn et al.**, 2010b; **Jablonski** 1993; **Leigh et al.**, 2004; **Leighton** 2005; **Moritz et al.**, 2000), desde considerar a los trópicos como regiones de muy bajas tasas de extinción, hasta proponer que la alta diversidad es producto de una rápida especiación durante el Cuaternario (**Haffer** 1969). Es aún más incierto cuando la naturaleza multiestratificada y dominada por angiospermas del bosque neotropical emergió, y que consecuencias tuvo en la dinámica hídrica, de nutrientes y carbono de los ecosistemas tropicales (**Boyce & Lee** 2010; **Burnham & Graham** 1999; **Burnham & Johnson** 2004). Esta serie de preguntas aún permanecen sin respuesta, a pesar de ser especialmente relevantes a la luz del cambio climático moderno.

La generación de especies ocurre en largas escalas de tiempo, por lo tanto, se requieren herramientas que preserven la información del pasado, como por ejemplo el ADN y el registro fósil, para entender los cambios en diversidad y la estructura de las comunidades terrestres a lo largo del tiempo geológico y como éstos se relacionan con cambios climáticos en el pasado. Ya que los bosques neotropicales modernos se conforman básicamente de angiospermas, un punto de partida natural para su estudio sería la época del origen de las angiospermas, a principios del Cretácico, hace 140 Ma (**sun et al.**, 2002). La historia del bosque neotropical es básicamente el estudio de la aparición de las angiospermas y su desarrollo y expansión hasta llegar a ser el clado dominante en los bosque modernos, un cambio en dominancia florística que transformó completamente los ecosistemas terrestres tropicales.

La historia de las comunidades terrestres neotropicales se podría dividir en dos grandes unidades, el Cretácico y el Cenozoico. Durante el Cretácico, aparecen las angiospermas y tienen una importante radiación (**Crane & Lidgard** 1989; **Magallón & Castillo** 2009)

y las comunidades de vertebrados terrestres eran dominadas por Dinosauria, con altas concentraciones de CO<sub>2</sub> (>1000ppm) (**Royer** 2010) y altas temperaturas (>7°C) (**Little et al.**, 2011) comparadas con valores modernos. El Cenozoico, de otro lado, se caracteriza por una dominancia completa de angiospermas (**Graham** 2011), rápidas radiaciones de mamíferos (**Gingerich** 2006; **simpson** 1983), y la transición de un planeta caliente durante el Paleógeno a un planeta frío durante el Neógeno (**Zachos et al.**, 2001).

Antes de empezar un discusión sobre el bosque húmedo neotropical, es importante definirlo, ya que "bosque húmedo tropical" es usado por diferentes autores con diferentes significados (**Burnham & Johnson** 2004). Aquí sigo la definición de **Burnham & Johnson** (2004) que refieren este vocablo a una combinación de cuatro parámetros: clima, composición florística, estructura del bosque y fisionomía de las plantas. Un bosque húmedo neotropical es un bosque de tierras bajas, con una precipitación media anual alta (>1.8 m/ano), temperatura media anual alta (>18°C), baja variación anual en temperatura (<7°C), dominada en diversidad y abundancia por angiospermas con las familias (de más a menos importantes) Leguminosae, Moraceae, Annonaceae, Euphorbiaceae, Lauraceae, Sapotaceae, Myristicaceae and Palmae representando ~50% de la diversidad, mientras que las familias Leguminosae, Palmae, Rubiaceae, Violaceae, Euphorbiaceae, Meliaceae, Sapotaceae y Moraceae representan ~57% de todos los árboles/arbustos en una hectárea dada. El bosque es también multiestratificado, con un dosel cerrado, dominado por angiospermas, con lianas y epifitas, y muchas especies con grandes hojas (mesófilas, >4500 mm<sup>2</sup>), márgenes enteros y ápices largo-acuminados.

## Cretácico

El registro más antiguo de angiospermas se encuentra en el Cretácico inferior (Barremiano, ~130 Ma) con *Clavatipollenites*, un polen fósil distribuido casi globalmente con registros en Israel, Inglaterra, África ecuatorial y Argentina (**Archangelsky & taylor** 1993; **Brenner** 1974; **Doyle et al.**, 1977; **Kemp** 1968) y *Walkeripollis*, un polen de la familia Winteraceae halla-

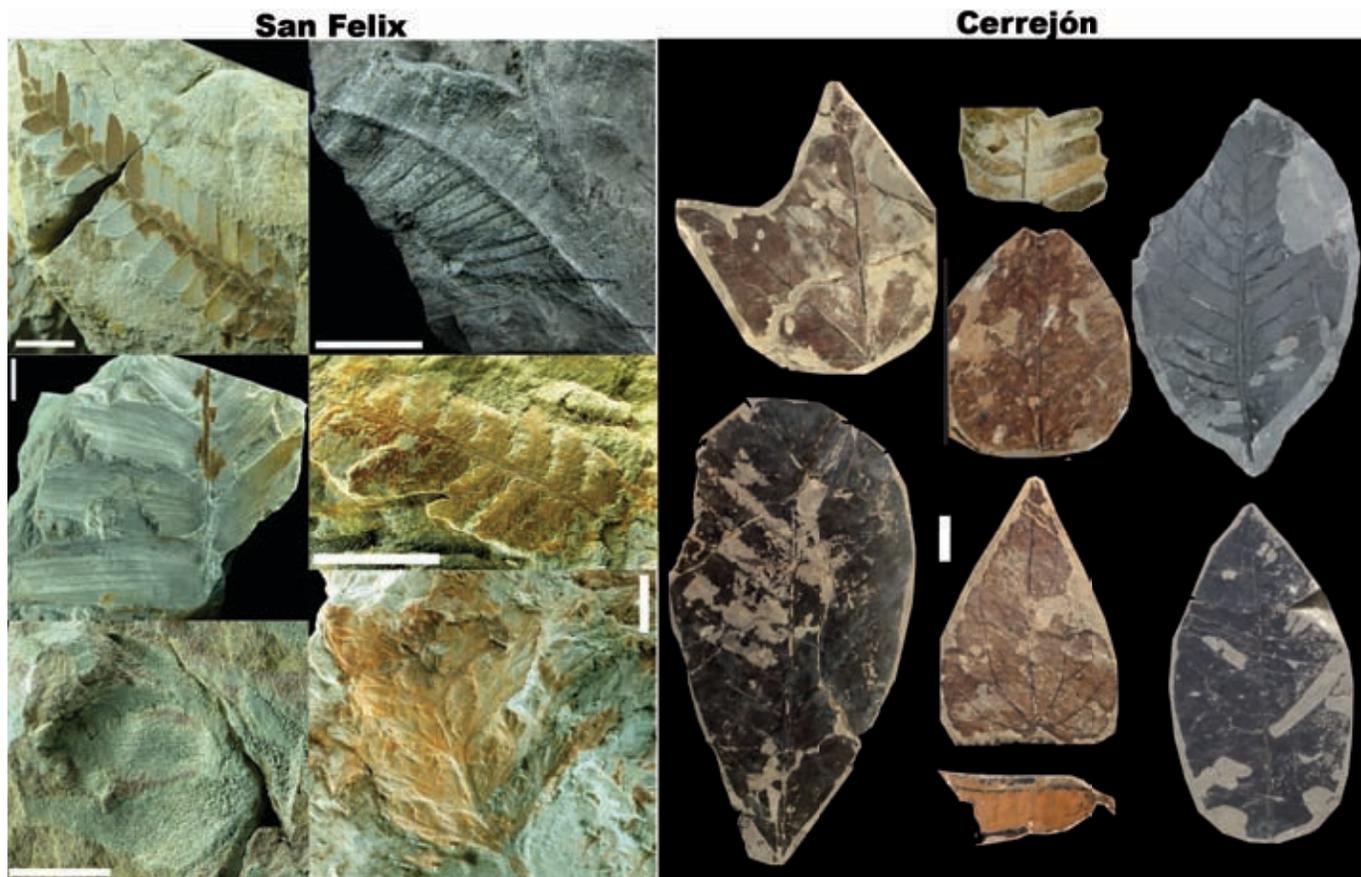
do en Africa ecuatorial (Doyle *et al.*, 1990). Los registros mas antiguos de megafósiles (hojas, flores, frutos) provienen del Aptiano (~122 Ma) de China e incluyen a *Archeofructus* y *Leeefructus* (sun & Dilcher 2002; sun *et al.*, 2011; sun *et al.*, 2002). No hay un claro patrón sobre la distribución latitudinal del origen de las angiospermas, con registros que incluyen de latitudes bajas hasta altas. Las angiospermas mas basales eran pequeñas, ruderales, con flores muy reducidas, y probablemente acuáticas o viviendo cerca de cuerpos de agua (sun *et al.*, 2002). Un meta-análisis global de los registros paleobotánicas del Cretácico (Crane & Lidgard 1989, 1990) muestran que las angiospermas incrementan gradualmente su diversidad y abundancia a lo largo del Cretácico y ya para el Maastrichtiano superan en diversidad a otros grupos de plantas como Cycadofitas, Pteridofitas (helechos), y Coniferales. Este análisis global, sin embargo, posee una escasa densidad de datos de latitudes tropicales, con la ausencia de sitios con macrofósiles en el Cretácico para zonas tropicales, y solo unos pocos sitios con datos palinológicos, la mayoría de los cuales fueron hechos con fines bioestratigráficos asociados a la industria del petróleo, sin tener en cuenta la totalidad de la flora. Aún hay, entonces, una gran incertidumbre sobre los patrones de dominancia, diversificación y distribución del bosque en zonas tropicales durante el Cretácico.

Filogenias basadas en DNA de taxa actuales, muestran una rápida radiación de los principales ordenes de angiospermas durante el Cenomaniano (~100-90 Ma) (Moore *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2009). Otros estudios, también basados en ADN, han mostrado incluso que muchas familias de angiospermas estaban presentes ya en el Cretácico (Bell *et al.*, 2010; Davis *et al.*, 2005). Estas filogenias, sin embargo contrastan con el registro fósil que indica un origen mucho más joven que el supuesto por los análisis moleculares. Un claro ejemplo de ello es el origen de las angiospermas, con las filogenias moleculares indicando un origen Jurásico (183 Ma) (Bell *et al.*, 2010; Wikström *et al.*, 2001), mientras que el registro fósil indica un origen Cretácico, mucho más joven (130 Ma) como se indicó antes. Esta disparidad en resultados es aún un gran problema sin resolver.

La disparidad entre ADN y fósiles no solo se refiere al origen de un clado en particular, también la génesis misma del bosque húmedo tropical está en disputa. Los resultados de los análisis moleculares han llevado a proponer que desde el Cenomaniano, los bosques ya eran dominados por angiospermas (Wang *et al.*,

2009) y que inclusive, ya existía en el trópico un boque húmedo dominado por angiospermas, similar en estructura al moderno (Davis *et al.*, 2005). Sin embargo, el registro fósil del Cretácico sugiere un panorama muy diferente. Variadas evidencias indican que las angiospermas no eran el elemento dominante, en términos de biomasa, en la mayoría de bosques Cretácicos. Madera fósil de angiospermas es muy escasa en el Cretácico (Wing & Boucher 1998) lo cual indica que eran escasos los arboles de angiospermas que alcanzaban el dosel. La gran mayoría de semillas de angiospermas Cretácicas tiene pequeños tamaños (Wing & Boucher 1998) indicando que no existían un dosel cerrado, a diferencia de los bosques multiestratificados modernos donde hay una gran variación en el tamaño de las semillas, producto de la competencia por la luz (Muller-Landau 2010). Los bosques tropicales modernos tiene altos valores de densidad de venas en las hojas, especialmente en las hojas del dosel, ya que la competencia por la luz es intensa, sin embargo la mayoría de angiospermas durante el Cretácico tenían densidad de venas más bajas que las actuales (Feild *et al.*, 2011a), sugiriendo la ausencia de un bosque multiestratificado. El registro fósil de lianas, típicas de bosques multiestratificados, principalmente Menispermaceae y Bignoniaceae, es casi inexistente en el Cretácico, mientras que es abundante en el Cenozoico (Burnham 2009; Doria *et al.*, 2008; Jacques *et al.*, 2011); las angiospermas no eran el elemento dominante en términos de biomasa ni siquiera durante el Maastrichtiano tanto en regiones neotropicales como temperadas, evidenciado tanto por el registro polínico (De la Parra *et al.*, 2008a; De la Parra *et al.*, 2008b) y de biomarcadores (Rangel *et al.*, 2002), como por el registro de macrofósiles (Wing *et al.*, 1993). La existencia de un bosque tropical estratificado dominado en el dosel por angiospermas durante el Cretácico, es pues, aún incierta.

La flora de San Felix (Hauteriviano, ~135 Ma), en la región de Caldas, es una de las más antiguas del Cretácico tropical, ha sido estudiada preliminarmente por un par de autores (Gonzalez 1977; Lemoigne 1984), y nuestros estudios recientes no han encontrado evidencias de angiospermas, pero si una dominancia de Benetitales, helechos, Cicadales y muy pocas coníferas (sucerquia & Jaramillo 2008). Es notoria la gran diferencia en morfología foliar entre las floras de San Felix, y las floras actuales [Figura 1. San Felix], no solo en el área de las láminas foliares, mucho más reducida en el Cretácico, sino en una muy baja densidad de venación de la floras de San Felix en comparación con



**Figura 1.** Comparación de la fisionomía de las hojas de un bosque del Cretácico inferior (San Felix), con un bosque del Paleoceno (Cerrejón). Escala corresponde a un centímetro. Es clara la gran diferencia entre ambos bosques, el Paleoceno es dominado por angiospermas, tiene hojas con alta densidad de venas, láminas mas grandes, márgenes enteros y ápices largo-acuminados, mientras que la flora del Cretácico inferior no tiene angiospermas, las láminas de las hojas son pequeñas, y carecen de ápices largo-acuminados.

bosques modernos (Feild *et al.*, 2011a) sugiriendo una capacidad fotosintética más reducida y por ende una menor biomasa. La flora Barremiana-Aptiana de Villa de Leiva encontrada en depósitos marinos se compone principalmente por Cicadales, Coníferas (Cupressoidae y Araucariaceae principalmente), y helechos, muchos de ellos con conexiones australes (Huertas 2003; Waveren *et al.*, 2002). Las palinofloras del Valle Superior del Magdalena y el piedemonte Llanero durante el Albiano -Aptiano estaban dominadas por una diversa flora de pteridofitas y gimnospermas (principalmente *Araucariacites*, Cicadas y *Classopollis*), y porcentajes de angiospermas menores al 5-10% (Mejia 2007; Mejia *et al.*, 2006). La alta proporción de helechos indica alta precipitación, indicando que al menos el occidente tropical no era seco, ya que algunos autores han interpretado amplias bandas cálidas y áridas en el trópico durante esta edad (Herngreen *et al.*,

1996). Durante el Cenomaniano, la baja dominancia de las angiospermas continúa y un grupo de gimnospermas, las Gnetaceas, incrementan sustancialmente su abundancia y diversidad (Herngreen & Dueñas 1990; Herngreen *et al.*, 1996), pero la alta abundancia y diversidad de helechos permanece, lo que indica que las condiciones húmedas continúan, en concordancia con algunos modelos del ciclo hidrológico del Cretácico, los cuales han inferido altas precipitaciones en las zonas tropicales (ufnar 2002; ufnar *et al.*, 2004; ufnar *et al.*, 2008). La variabilidad morfológica en las angiospermas se incrementa, con nuevos tipos de apertura en el polen, y formas tricolpadas y tricolporadas son ya muy comunes. Este es un patrón similar al observado en Norteamérica (Doyle & Hickey 1976; Lupia *et al.*, 1999) aunque en el trópico nunca ha sido cuantificado. Aún no se han encontrado macrofloras de esta edad en zonas tropicales, a pesar de ser una época crítica

en la evolución de las angiospermas. Esta composición y dominancia de las comunidades vegetales del neotrópico en el Cenomaniano, contrasta con la radiación rápida y global de las angiospermas mostrada por los datos moleculares, lo cual sugiere que la innovación morfológica de las angiospermas habría precedido por decenas de millones de años su dominancia ecológica. En otras palabras, a pesar de que las angiospermas se estaban diversificando rápidamente y aumentando su cubrimiento geográfico, aun estaban lejos de dominar en términos de biomasa la mayoría del paisaje. Este cambio ocurrió mucho tiempo después como se anota adelante.

Hacia finales del Cenomaniano y principios del Turoniano, el planeta alcanza los niveles más altos de temperatura media global en los últimos 140 Ma (**Bice et al.**, 2006), y en el trópico superaron los 7°C comparado con valores modernos, así como altos niveles de CO<sub>2</sub> superando los 1000 ppm (**Royer** 2006). Niveles estáticos del mar se elevaron también a su máximo nivel en los últimos 140 Ma y grandes aéreas continentales fueron inundadas formando mares epicontinentales (**Haq et al.**, 1988). En las épocas post-Cenomanianas, hay una gran reducción de los Gnetales en el neotrópico, aunque es incierto que tan grande o abrupta fue esta reducción, ya que existen muy pocos estudios al respecto.

El Cretácico superior (90-65 Ma) se caracteriza por una reducción gradual y lenta de la temperatura global, así como de los niveles del CO<sub>2</sub>. Muy poco se conoce sobre el desarrollo de la vegetación neotropical durante esta época. Durante el Maastrichtiano (70-65 Ma), el nivel del mar empezó a descender rápidamente, y grandes planos costeros emergieron (**nichols & Johnson** 2008). La paleoflora Maastrichtiana de la Formación Guaduas, en el centro de Colombia, indica una co-dominancia de Angiospermas, Cicadales, Gimnospermas (Araucariaceae) y Pteridofitas (helechos), con varias familias de Angiospermas ya presentes incluyendo Palmae, Annonaceae, Lauraceae, Piperaceae, Rhamnaceae, y muchos otros taxa cuyas afinidades naturales son aún desconocidas (**Correa et al.**, 2010; **García** 1958; **Gutierrez & Jaramillo** 2007; **sarmiento** 1992; **sole de Porta** 1971). A nivel palinológico, el Maastrichtiano es codominado por Angiospermas y helechos, con Angiospermas representado el ~50% de la asociación (**De la Parra et al.**, 2008a; **De la Parra et al.**, 2008b), lo cual es confirmado por la relación de los biomarcadores Oleanano/Opano (**Rangel et al.**, 2002) los cuales sugieren que las Angios-

permas no eran el principal elemento en términos de biomasa durante el Maastrichtiano. Es también notoria la presencia de únicamente semillas pequeñas y la total ausencia de semillas grandes, así como la ausencia de Menispermaceae y Bignoniaceae, las familias con más abundancia de lianas. Florísticamente Guaduas aun no corresponde a un bosque neotropical, aunque su fisionomía muestra ya altas proporciones de hojas con ápices largo-acuminados, margen entero, grandes áreas, y alta densidad de venas (**Feild et al.**, 2011a) similares a los bosque modernos. Esta panorama del Maastrichtiano en el neotrópico, también se asemeja a depósitos del Maastrichtiano en Nebraska, donde un depósito de cenizas cubrió el paisaje preservando los mas cercanos al plano inundable (donde el potencial de fosilización es mayor), como los alejados de él (en las zonas altas, con bajo potencial de fosilización y que rara vez pueden ser estudiadas). Este mostró como las angiospermas eran el elemento dominante en los planos inundables, similares a los depósitos de la formación Guaduas, pero en la mayoría del paisaje representaban apenas el 12% de la dominancia (**Wing et al.**, 1993). La mayoría de las Angiospermas eran además herbáceas. Esto también se correlaciona con la poca madera de Angiospermas encontrada en el Cretácico, que contrasta con la gran abundancia de maderas de angiospermas en el Cenozoico.

La multitud de elementos mencionados anteriormente sugieren que los bosques neotropicales Cretácicos eran muy diferentes a los bosques actuales, probablemente sin una estructura multiestratificada y un dosel cerrado, y por el contrario, eran bosque abiertos, probablemente con un dosel dominado por gimnospermas. Las angiospermas eran arbustos o pequeñas plantas, ruderales principalmente, dominantes en los planos inundables pero no en la mayoría del paisaje, y sin llegar a ser el elemento principal de la biomasa en el bosque maduro.

Esta composición y estructura del bosque cambió radicalmente como consecuencia del impacto de un meteorito en la península de Yucatán y todos los eventos climático que le siguieron (**nichols & Johnson** 2008). En el neotrópico, usando palinología, se ha estimado una extinción del 75% de las especies de plantas presentes durante el Cretácico mas superior (**De la Parra** 2009), este nivel de extinción es más alto que el reportado en zonas templadas de Norteamérica, donde ~30% de las especies, usando polen como indicador, se extinguieron (**Hotton** 2002). La flora que está presente en el Paleoceno (ver siguiente sección), es ya un

bosque neotropical multiestratificado similar al actual. Esto sugiere que un accidente histórico como el acaecido en Yucatán, cambió la estructura y composición del bosque neotropical permanentemente, y muestra un claro ejemplo que como el éxito ecológico de las angiospermas se retrasó ~55 Ma en relación al origen de sus innovaciones morfológicas.

Este cambio florístico y estructural del bosque neotropical, pudo haber tenido consecuencias climáticas importantes. Hoy en día, una parte importante de la lluvia sobre la Amazonia proviene de la evaporación misma de los árboles. Las angiospermas además tienen una capacidad fotosintética más alta que las gimnospermas, debido entre otras cosas, a una más alta densidad de venas en sus hojas (**Boyce & Lee** 2010). La densidad de venación en las angiospermas de la mayoría del Cretácico era baja, comparable a la de las gimnospermas (**Feild et al.**, 2011a; **Feild et al.**, 2011b), pero a principios del Cenozoico, la densidad de venación aumentó considerablemente en las angiospermas a niveles comparables a los bosque modernos (**Feild et al.**, 2011a). Experimentos de sensibilidad climatológica han demostrado que reemplazar un bosque de angiospermas por uno de coníferas en el Amazonas, al tener menor densidad de venas y por ende una menor capacidad fotosintética y transpiración, se generarían temperaturas medias anuales más altas (3°C), disminuiría la precipitación en un 30%, y aumentaría la extensión de la época seca en dos meses (**Boyce & Lee** 2010). Esto sugiere que el cambio en el paisaje de un bosque dominado por coníferas y helechos a uno con predominancia de angiospermas con alta densidad de venación, como sucedió en la transición Cretácico-Paleoceno, habría transformado el clima tropical, permitiendo que fuera más húmedo, y menos caliente y estacional.

Por qué las angiospermas fueron exitosas y radiaron durante el Cretácico en ambientes ruderables e inundables? esto es aun una pregunta sin resolver, pero una hipótesis plausible radica en el tiempo necesario para producir el tubo polínico, un paso necesario para la producción de semillas. Mientras que el tubo polínico en gimnospermas toma mucho tiempo, más de un año en muchos casos, éste en angiospermas, en contraste, se produce mucho más rápido, inclusive en menos de 2 horas en algunos casos (**Williams** 2008). Es claro, por consiguiente, que para las angiospermas habría sido una gran ventaja el poder producir rápidamente semillas, especialmente en sistemas inundables y ruderales, donde el paisaje cambia constantemente y

las plantas tienen que producir semillas y crecer rápido antes de que el próximo evento ocurra.

## Paleógeno

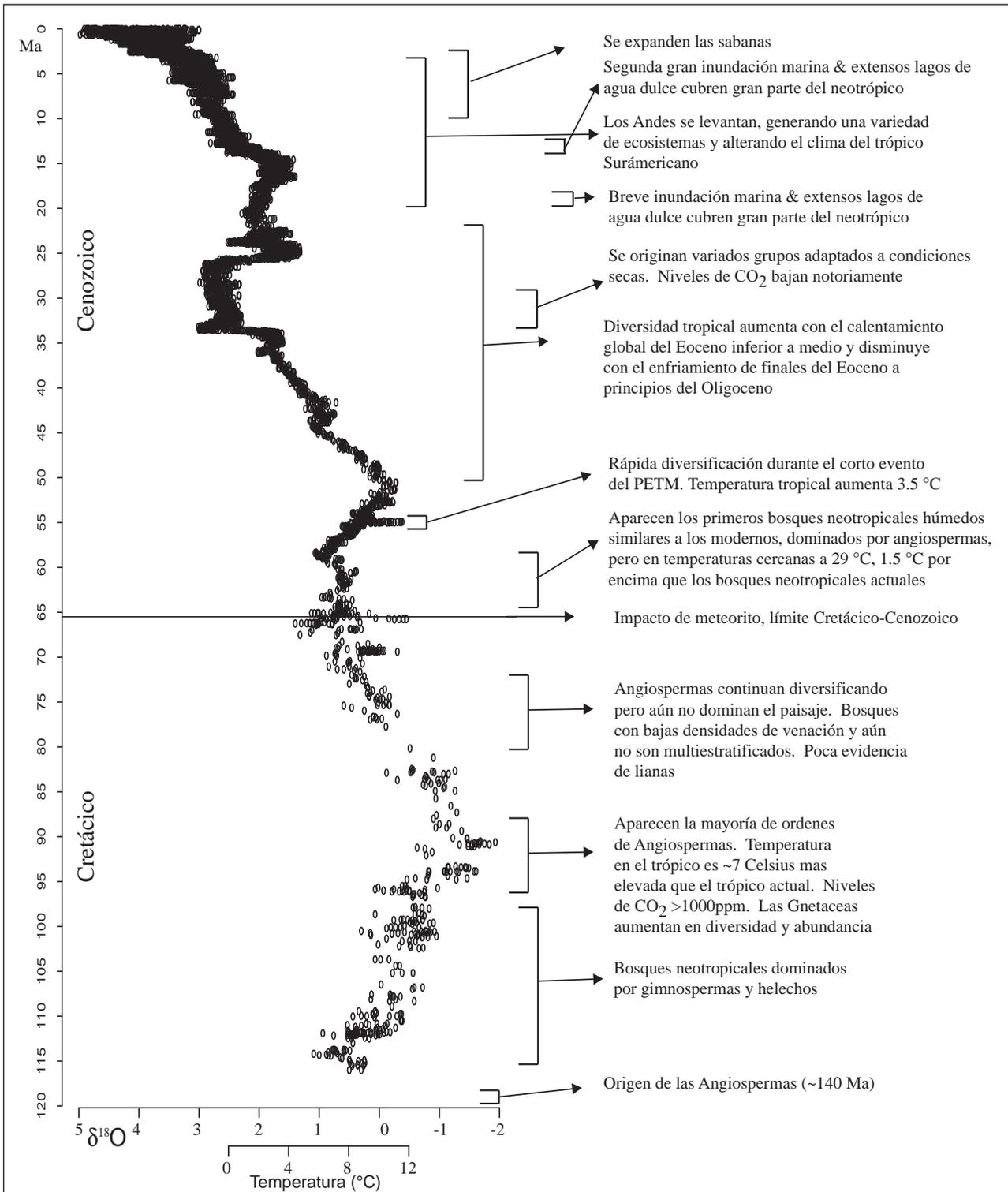
Las floras del Paleoceno neotropical eran ya dominadas por angiospermas (~80% de la palinoflora) (**De la Parra** 2009; **Jaramillo et al.**, 2006; **Van der Hammen** 1958), con biomarcadores señalando una dominancia de angiospermas (**Rangel et al.**, 2002), una fisionomía propia de bosque tropicales (márgenes enteros, hojas grandes, abundancia de ápices largo-acuminados) (**Wing et al.**, 2009), y una composición florística similar a los bosques neotropicales modernos incluyendo Fabaceae, Moraceae, Annonaceae, Euphorbiaceae, Lauraceae, Sapotaceae, Arecaceae, Araceae, Flacourtiaceae, Anacardaceae, Tiliaceae y Meliaceae (**Carvalho et al.**, 2011; **Doria et al.**, 2008; **Gomez et al.**, 2009; **Herrera et al.**, 2008; **Jaramillo et al.**, 2007; **Pons** 1988; **Wing et al.**, 2009). También poseían Menispermaceae en abundancia (**Doria et al.**, 2008), una familia típica de lianas, que sumado a la alta densidad de venación (**Feild et al.**, 2011a) y a la varianza alta en el tamaño de las semillas alcanzando inclusive los 20 cm (**Gomez et al.**, 2009), indican ya un bosque donde la competencia por la luz es alta y un dosel cerrado, característico de los bosque multiestratificados. Es notoria además la alta abundancia de Fabaceae, la familia de árboles/arbustos más abundante en los bosques tropicales modernos, la cual estaba ausente en el Cretácico. Este amplio conocimiento del Paleoceno ha sido proporcionado en gran parte por los estudios que hemos adelantado en las minas de carbón del Cerrejón, la más grande del mundo a cielo abierto. Los tajos en esta mina ofrecen la posibilidad de explorar grandes extensiones de roca con muy poca alteración. En ocasiones es posible recorrer una extensión de 25 Km<sup>2</sup> por el mismo estrato rocoso, haciendo posible explorar instantes del tiempo hace 60 Millones de años. Esto también ha permitido entender no solo la flora, sino también su fauna, clima y ambientes de depósito. Tortugas de agua dulce de gran tamaño llegando a los 2 metros y relacionadas a las charapas del Orinoco, cocodrilos de variados tipos, Dyrosauridae principalmente, algunos de ellos de 12-15 metros de envergadura, serpientes relacionadas a las boas alcanzando los 13 metros de largo y un metro de diámetro, peces pulmonados de 2 metros de largo y variados moluscos han sido encontrados en estos depósitos (**Bayona et al.**, 2011; **Cadena & Jaramillo** 2006; **Hasting et al.**, 2010; **Hasting et al.**, 2011; **Head et al.**, 2009a; **Head et**

*al.*, 2009b), indicando un ecosistema con alta productividad y una fauna de reptiles diversa. Es de anotar que mamíferos aun no han sido encontrados, sugiriendo que eran muy escasos. Los depósitos del Cerrejón representan el bosque neotropical multiestratificado más antiguo que se conoce, similar al moderno, pero con dos marcadas diferencias: La primera, estos bosque vivieron a temperaturas medias anuales  $\sim 1.5\text{-}2^\circ\text{C}$  mas altas que los bosque modernos, casi el doble de  $\text{CO}_2$  ( $\sim 400\text{-}500$  ppm) (Royer 2010), y precipitaciones medias anuales de  $\sim 3.2$  metros (Wing *et al.*, 2009). Estimados de temperatura media anual del Cerrejón y regiones cercanas indican  $\sim 29^\circ\text{C}$ , usando variadas técnicas incluyendo  $\text{TEX}_{86}$  (Jaramillo *et al.*, 2010b), el método del análisis del margen de las hojas (Peppen *et al.*, 2011; Wing *et al.*, 2009), o morfología de las serpientes (Head *et al.*, 2009a; Head *et al.*, 2009b). La segunda diferencia es que la diversidad era mucho más baja que los bosques actuales (Jaramillo *et al.*, 2007; Wing *et al.*, 2009), lo cual podría ser debido a factores edáficos de los ambientes inundables del Cerrejón, aunque esta baja diversidad del Paleoceno se observa en diversos ambientes de acumulación de Colombia y Venezuela (Jaramillo *et al.*, 2006). Otra alternativa es que la recuperación de los niveles de diversidad después de la extinción masiva del Cretácico-Paleoceno haya tomado varios millones de años, como se ha observado en otros eventos de extinción masiva (erwin 2008).

A principios del Eoceno ocurrió un evento que ha sido denominado PETM (Paleoceno Eocene Thermal Maximum)(McInerney & Wing 2011). Un evento de muy corta duración ( $\sim 200\text{Ky}$ ) que comenzó a los 56.3 Ma, y durante el cual la temperatura global aumentó en  $5\text{-}7^\circ\text{C}$  en  $\sim 10,000\text{-}20,000$  años (Kennett & stott 1991; Westerhold *et al.*, 2009; Zachos *et al.*, 2003). Este calentamiento tan rápido y fuerte se produjo por la adición de un mínimo de 2000-3000 Gigatonnes de Carbono (Bowen & Zachos 2010), que equivalen a alrededor de 900 ppm de  $\text{CO}_2$  y que fueron agregados a una atmósfera Paleocena que contenía alrededor de 400 ppm de  $\text{CO}_2$ . Esta es una de las adiciones de Carbono a la atmósfera más intensa y rápida de los últimos 120 millones de años y produjo un calentamiento producto del efecto invernadero, similar al que vivimos actualmente aunque 10 veces más lento (McInerney & Wing 2011). Se estima que para el año 2300, se habrán liberado 2000-3000 gigatonnes de Carbono, equivalente a 1400 ppm de  $\text{CO}_2$ , es decir en 400 años se inyectarán a la atmosfera la misma cantidad de Carbono que se liberó en los primeros 20.000 años del

PETM. El PETM es pues, un buen análogo para entender las consecuencias del calentamiento moderno. Un dato para tener en cuenta, es que se requiere tiempo geológico para capturar un volumen dado de  $\text{CO}_2$  que se añade a la atmósfera. Durante el PETM, tomó  $\sim 180,000$  años regresar a los niveles de  $\text{CO}_2$  previos al PETM (Bowen & Zachos 2010). En modelos para el clima actual, con una inyección inicial de 1000 ppm de  $\text{CO}_2$  (ya se han inyectado  $\sim 100$  ppm en los últimos 100 años) y asumiendo que la inyección de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera se detiene, requería tiempo geológico para regresar a los niveles pre-inyección (Archer *et al.*, 2009). Después de 1.000 años, el 25 al 60 % de la inyección de  $\text{CO}_2$  inicial aun permanecería en la atmósfera (Archer *et al.*, 2009), ya que la forma más efectiva para secuestrar  $\text{CO}_2$  atmosférico es la meteorización de carbonatos y silicatos en el continente, la cual opera a escalas de tiempo geológico. Esto sugiere, que aunque detengamos el flujo de  $\text{CO}_2$  de inmediato, ya hemos alterado los niveles de  $\text{CO}_2$  del mundo en que vivirá la humanidad en los próximos milenios.

El PETM se descubrió en corazones tomados del mar profundo por el programa del ODP (Kennett & stott 1991; Westerhold *et al.*, 2009; Zachos *et al.*, 2003). En el límite Paleoceno-Eoceno, siempre se encontraba un nivel de sedimento donde el carbonato había desaparecido. Este nivel también estaba asociado a una excursión negativa de  $\sim 4\text{-}5$  per mil de  $\text{D}^{13}\text{C}$ , la cual también se encontró posteriormente en zonas continentales (Wing *et al.*, 2005). Esta disolución del carbonato y la excursión negativa en  $\text{D}^{13}\text{C}$ , sólo podría ser explicada por una liberación masiva de carbón con bajos niveles de  $^{13}\text{C}$ . Varias hipótesis han sido propuestas para dilucidar el origen de este carbono, y esto es un motivo de gran controversia (McInerney & Wing 2011). Los hidratos de metano son un gran reservorio de metano en el fondo del océano, y la liberación de una gran cantidad de ellos ( $\sim 4300$  gigatonnes) podría haber ocasionado el PETM, ya que el metano rápidamente se oxida y transforma en  $\text{CO}_2$  (Bralower *et al.*, 1998; Dickens 1998; Dickens *et al.*, 1995). Sin embargo el volumen de hidratos en el océano es un motivo de discusión. El PETM produjo grandes transformaciones en el océano, con extinciones masivas de foraminíferos bentónicos (Thomas & Shackleton 1996), y radiaciones en foraminíferos plantónico. En el continente, los cambios fueron aun más drásticos. La mayoría de órdenes de mamíferos modernos se originaron durante el PETM, incluyendo los artiodactilos (ciervos), perisodactilos (caballos), y los primates (sin incluir los plesiadapimorfes), y además se disper-



**Figura 2.** Comparación de los mayores eventos en la historia de los bosques bajos neotropicales versus la curva isotópica de δ<sup>18</sup>O derivada de foraminíferos bentónicos (Cenozoico (Zachos et al., 2001), Cretácico (Huber et al., 1995; Huber et al., 2011; Huber et al., 2002), la cual es una indicadora de la temperatura promedio del fondo del océano. La escala de temperatura fué calculada por Zachos et al, (2001) para los periodos libres de hielo. Del Oligoceno al reciente, la curva representa una mezcla de temperatura y volumen de hielo.

saron rápidamente por Asia, Europa y Norteamérica (**Clyde & Gingerich** 1998). El efecto en las plantas es diverso, por ejemplo en latitudes medias como en Wyoming, occidente de Estados Unidos, es evidente una migración muy fuerte de plantas provenientes del sur, compuesta por angiospermas, que reemplazan la vegetación existente en Wyoming que era una mezcla de coníferas y angiospermas (**Wing et al.**, 2005). Esta vegetación del PETM tiene además una intensidad de herbívora más alta que las floras del Paleoceno (**Currano et al.**, 2008). Al culminar el evento de calentamiento, la flora pre-PETM regresa a su territorio original y desplaza a la vegetación migrante. En el proceso hay muy pocas extinciones u originaciones, y casi todos los cambios en vegetación obedecen a migraciones. En el neotrópico, en contraste, los efectos de este evento son diferentes. Datos del registro fósil que provienen de tres sitios en el nororiente de Colombia y noroccidente de Venezuela indican que la temperatura ascendió  $\sim 3.5^{\circ}\text{C}$  en el neotropico durante el PETM (**Jaramillo et al.**, 2010b), similar a la temperatura determinada para el océano tropical durante este mismo evento (**Zachos et al.**, 2003). La vegetación tuvo un rápido incremento en su diversidad, alrededor de un 30%, con un nuevo conjunto de taxa que fueron agregados a la vegetación pre-existente en el Paleoceno (**Jaramillo et al.**, 2010b). La tasa de extinción no varió, mientras que las originaciones se duplican, con muchos taxa apareciendo por primera vez en el neotrópico, sugiriendo que estos nuevos elementos son un producto evolutivo, más que una migración de otras regiones. Esta radiación de variados clados tropicales aun se observa en la filogenia de plantas neotropicales, como en los helechos epifitos característicos de bosques neotropicales húmedos, orquídeas, y hormigas agricultoras (**Ramirez et al.**, 2007; **Schuettpelz & Pryer** 2009; **Schultz & Brady** 2008).

Tampoco existe evidencia de un incremento en la aridez como consecuencia del calentamiento, y es evidente un aumento en la eficiencia en el uso del agua por parte de las plantas debido al aumento de  $\text{CO}_2$ , la cual se ve reflejada en la señal isotópica de  $\text{D}^{13}\text{C}$  (**Jaramillo et al.**, 2010b), que también se ha demostrado en experimentos con plantas actuales en el trópico (**Cernusak et al.**, 2011). Estos resultados contrastan con modelos paleoclimáticos para el PETM que han predicho temperaturas medias anuales superiores a los  $45^{\circ}\text{C}$  para el neotrópico, y un colapso generalizado de la vegetación en el trópico Suramericano (**Bowen & Zachos** 2010; **Huber** 2008; **Huber & Caballero** 2011). Los modelos paleoclimáticos aún son incapaces de re-

producir el clima durante el PETM, cuando el gradiente termal entre los polos y el ecuador se redujo bastante. Los diversos modelos propuestos emplean  $\text{CO}_2$  para elevar la temperatura en los polos a través del efecto invernadero (**Huber & Sloan** 1999, 2000; **Huber et al.**, 2003; **Shellito et al.**, 2003; **Sloan & Barron** 1992; **Sloan & Morrill** 1998; **Sloan & Rea** 1995; **Sloan & Thomas** 1998; **Sloan et al.**, 1995), pero cuando hacen esto, la temperatura en los trópicos se eleva demasiado. Existe pues un mecanismo aún desconocido, que hace posible que los polos se calienten mucho más rápido que los trópicos. Este mecanismo está ausente en los modelos climáticos usados actualmente, y su hallazgo representa un gran reto para la comunidad científica.

La rápida culminación del PETM es también una pregunta sin resolver. El PETM termina 10 veces más rápido de lo esperado por la captura de  $\text{CO}_2$  a través del proceso de meteorización normal (**Bowen & Zachos** 2010). Una hipótesis que ha sido planteada anteriormente, es que tanto el comienzo como el final del PETM fueron facilitados por el colapso de la vegetación tropical (**Bowen & Zachos** 2010; **Huber** 2008). El comienzo del PETM habría sido facilitado por la destrucción masiva en el trópico ya que el carbono de estas plantas se agregaría al reservorio atmosférico. El final del evento, por su parte, también habría sido facilitado por el resurgimiento de la vegetación que absorbería grandes cantidades de carbón atmosférico. Pero la vegetación tropical no colapsó, por el contrario aumentó su diversidad, como se mostró anteriormente. También hubo un aumento en la eficiencia en el uso del agua (WUE) por parte de las plantas tropicales durante el PETM (**Jaramillo et al.**, 2010b) al crecer los niveles de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. El WUE es la proporción de agua que usa la planta para hacer fotosíntesis y biomasa versus la proporción de agua que pierde a través de la transpiración. Se podría argumentar que el aumento en WUE podría ser debido a la combinación de un aumento en la biomasa (reflejado en el aumento de la diversidad, ya que hay una fuerte relación positiva entre biomasa y diversidad), y una disminución en el agua que la planta transpira (lo que implica que mayor cantidad de agua llega a la tabla de agua y los diversos afluentes hídricos, aumentando la capacidad de erosión y por consiguiente el consumo de  $\text{CO}_2$  atmosférico (**de Boer et al.**, 2011; **Lammertsma et al.**, 2011)). Podría ser entonces, que las plantas tropicales facilitaron la terminación del PETM capturando  $\text{CO}_2$  a través de incremento tanto en biomasa como en la capacidad de meteorización.

Desde el Eoceno (56 Ma) y hasta el Mioceno inferior (~16 Ma) hay una larga variación en la temperatura global, con un aumento gradual de temperatura durante el Eoceno inferior hasta un nivel máximo a finales del Eoceno inferior y comienzos del medio, y luego hay un descenso lento de la temperatura durante el Eoceno superior, con un enfriamiento pronunciado en la transición Eoceno-Oligoceno, hace ~34 Ma, que es concomitante con el inicio de la glaciación en la Antártica (**Anderson et al.**, 2011; **Liu et al.**, 2009; **Zachos et al.**, 2001). Este a su vez, podría ser consecuencia de la separación entre Sur América y Antártica a finales del Eoceno, que hizo posible la existencia de una corriente circumpolar, y por consiguiente el desarrollo de hielo en casquete polar. Durante el Oligoceno la temperatura global es estable, con un leve calentamiento a finales del Oligoceno, que es interrumpido por otro enfriamiento a principios del Mioceno (**Zachos et al.**, 2001). La diversidad del bosque neotropical sigue las mismas variaciones que la temperatura global, con un aumento durante los calentamientos globales, y un descenso durante los enfriamientos (**Jaramillo et al.**, 2006), alcanzando durante el Eoceno medio niveles superiores a la diversidad moderna. Esto podría ser debido a un efecto combinado entre la temperatura, que al incrementar eleva la tasa de mutación molecular (**Wright et al.**, 2006), y la expansión de las zonas tropicales, ya que hay una relación directa entre el área disponible para un bioma y su diversidad local, a mayor área, mayor diversidad local (**Fine & Ree** 2006; **Fine et al.**, 2008; **Rosenzweig** 1995). El enfriamiento global, en contraste, provoca el efecto opuesto, una disminución en la tasa de originación, y una reducción de las zonas tropicales.

Variados autores han predicho que los ecosistemas tropicales colapsarán como consecuencia del aumento de temperatura global ya que la vegetación tropical moderna vive muy cerca de su óptimo climático (**Huber** 2008; **stoskopf** 1981; **t ewksbury et al.**, 2008). Varios efectos negativos en las plantas se observan cuando la temperatura se incrementa, incluyendo un aumento en la respiración que decrece la producción neta, un descenso en la fotosíntesis, un aumento en la emisión de isoprenos, un aumento en el riego de daños por luz, y un aumento en el estrés de las hojas (**Bassow et al.**, 1994; **Huber** 2008, 2009; **Lerdau & t hroop** 1999; **Lewis et al.**, 2004; **stoskopf** 1981; **t ewksbury et al.**, 2008), aunque estudios recientes con hojas en arboles del dosel han mostrado que el límite termal superior está en 50-53°C (**Krause et al.**, 2010). Cómo explicar entonces, que durante calentamientos en el pasado

geológico, las plantas tropicales no fueron afectadas negativamente y por el contraste aumentaron su diversidad y biomasa a variadas escalas temporales? La temperatura de las hojas, que es factor esencial para las plantas, depende principalmente de tres factores, la temperatura del aire, los niveles de CO<sub>2</sub> atmosféricos, y la humedad del suelo. La combinación de estos tres factores, determina la respuesta de una planta al incremento de la temperatura ambiental. Las épocas de calentamiento global del Cretácico y Paleógeno están caracterizadas por elevados niveles del CO<sub>2</sub>, altas precipitaciones en el neotrópico (**Jaramillo et al.**, 2010b; **Royer** 2010; **ufnar** 2002; **ufnar et al.**, 2004; **ufnar et al.**, 2008; **Wing et al.**, 2009) y bajos niveles de aridez como se evidenció en el PETM, donde los isotopos de Deuterium y la composición florística señalan que la precipitación efectiva no disminuyó (**Jaramillo et al.**, 2010b). Estudios fisiológicos indican que las plantas son más efectivas haciendo fotosíntesis a temperaturas más altas (hasta 10°C) si se encuentran bajo niveles altos de CO<sub>2</sub> y con una alta humedad del suelo (**Aber et al.**, 2001; **Berry & Bjorkman** 1980; **Lloyd & Farquhar** 2008; **niu et al.**, 2008). Además, la eficiencia en el uso del agua de las plantas incrementa casi en un 50% cuando los niveles de CO<sub>2</sub> aumentan (**Cernusak et al.**, 2011). Las bases genéticas para hacer fotosíntesis está muy conservada dentro de la filogenia de las plantas lo que sugiere que las plantas en el Eoceno y Paleoceno usaban básicamente los mismos elementos que usan las plantas modernas para hacer fotosíntesis. Esto sugiere que las plantas modernas podrían ya poseer la variabilidad genética necesaria para responder a cambios de temperatura y CO<sub>2</sub> como algunos han sugerido (**Lloyd & Farquhar** 2008).

## neógeno

Los últimos 15 millones de años representan un capítulo diferente para la historia de los bosques neotropicales, ya que las sabanas se extienden radicalmente. Hoy en día, las sabanas ocupan el 30% del territorio global, proveen la mayor parte del alimento que consumimos y el área de habitación para un gran porción de la población humana (**Jacobs et al.**, 1999). Los pastos de las sabanas tropical poseen <2% de las especies de plantas (**sage et al.**, 1999), sin embargo capturan un 20% del carbón terrestre (**Lloyd & Farquhar** 1994). Aunque las sabanas son tan importantes, es aún muy poco lo que sabemos sobre su origen y los factores que las controlan, especialmente en los trópicos suramericanos (**edwards et al.**, 2010). Todo indica que

hace 15 Ma las sabanas no estaban muy extendidas (**edwards et al.**, 2010) y su expansión en el Neógeno representan el nacimiento de un nuevo ecosistema.

Las variaciones de temperatura media anual dentro de la zona tropical son mínimas, de 23 a 28°C, con variaciones muy bajas a lo largo del año. El factor que determina en gran medida el tipo de vegetación dentro del trópico es la precipitación. Hay una continua variación de bosque húmedo, a bosque seco, sabana y desierto en la medida que la precipitación anual disminuye, y el aumento de la duración de la época seca aumenta (**Lehmann et al.**, 2011). Otro factor importante en los últimos 15 Ma lo constituye la disminución de CO<sub>2</sub> a niveles similares a los encontrados en épocas preindustriales. Esta disminución empezó a comienzo del Oligoceno (~34 Ma), y ya para principios del Mioceno, los niveles de CO<sub>2</sub> alcanzaban niveles similares a los modernos (**Royer** 2006, 2010; **Royer et al.**, 2011). Hay un aumento rápido pero corto durante el Mioceno medio (15-13 Ma), y otro durante el Plioceno inferior (5-3 Ma), pero los niveles base de CO<sub>2</sub> son similares a los modernos. Estos aumentos de CO<sub>2</sub> también corresponden a periodos de calentamiento global, tanto en el Mioceno medio (**Zachos et al.**, 2001) como en el Plioceno inferior (**Filippelli & Flores** 2009; **Ravelo et al.**, 2006). Durante las épocas glaciares/interglaciales de los últimos 2.7 Ma, los niveles de CO<sub>2</sub> oscilaron con la temperatura alcanzando ~280 ppm durante periodos interglaciares y disminuyendo ~80-100 ppm durante periodos interglaciares (**Lüthi et al.**, 2008; **Monnin et al.**, 2001; **siegenthaler et al.**, 2005; **tripati et al.**, 2009).

Hay cuatro grandes grupos de plantas que son características de estos ambientes secos, Cactaceae, Agavaceae, Poaceae y las llamadas "ice plants" de Suráfrica (**Arakaki et al.**, 2011). Muchas de ellas tienen algunas de dos formas alternas de hacer fotosíntesis, C4 o CAM. La mayoría de árboles y en general de plantas hacen la llamada fotosíntesis C3. Por el contrario, los caminos fotosintéticos C4 y CAM son mucho más eficientes que C3 en zonas donde las temperaturas son muy elevadas y hay deficiencia de agua y/o hay niveles bajos de CO<sub>2</sub> (**edwards et al.**, 2010). Las plantas no pueden hacer fotosíntesis por la vía C3 (C3), porque perderían mucha agua por transpiración al abrir los estómatos en zonas de altas temperaturas y depresión hídrica; o si los niveles de CO<sub>2</sub> son muy bajos tendrían que mantener abiertos los estómatos por mucho más tiempo para capturar la misma cantidad de CO<sub>2</sub>,

con la consecuente pérdida extra de agua. Las plantas que hacen fotosíntesis por vía C4 y CAM, en contraste, realizan la fotosíntesis utilizando procesos más complejos pero más efectivos cuando hay estrés hídrico o bajos niveles de CO<sub>2</sub>. La filogenia de los cuatro grupos grandes de plantas de zonas secas mencionadas arriba, indican que se originaron a finales del Eoceno y principios del Oligoceno, probablemente asociados al descenso pronunciado en CO<sub>2</sub> global de finales del Eoceno, ~34-36 Ma (**Arakaki et al.**, 2011). No obstante su radiación ocurre muchos millones de años después, en el Mioceno superior a Plioceno, hace alrededor de 7-8 Ma (**Arakaki et al.**, 2011; **edwards et al.**, 2010), lo que implica que su radiación depende de un mecanismo diferente al de su origen, ya que los niveles de CO<sub>2</sub> del Mioceno ya eran similares a los actuales. Esta radiación filogenética, parece coincidir con la expansión del área ocupada por sabanas deducida del registro fósil. Esta expansión de las sabanas no es coetánea a nivel global, aunque el número de registros disponibles es aún muy bajo (**edwards et al.**, 2010). En Kenia la expansión de las sabanas con Poacea-C4 ocurre a los 6-8 Ma, mientras que las sabanas C3 se expanden a los 9 Ma (**uno et al.**, 2011). En Pakistán las sabanas C4 se expanden a los 7 Millones (**Morgan et al.**, 1994), casi al mismo tiempo que las sabanas C3 (9 Ma). En el neotrópico es muy escasa la información sobre cuando se desarrollaron las sabanas (**Wijmstra & Van der Hammen** 1966). Áreas que hoy corresponden a bosques muy secos y sabanas como en el valle superior del Magdalena (región de Villavieja), eran bosques mucho más húmedos hace 13 Ma (**Kay et al.**, 1997). En Urumaco, región de Falcon al occidente de Venezuela, registros fósiles del Mioceno superior (~9 Ma) indican la presencia de un bosque más húmedo, muy diferente a la extensa vegetación seca que se presenta hoy en la región (**Aguilera** 2004; **Díaz de Gamero & Linares** 1989; **Hambalek** 1993; **Hambalek et al.**, 1994; **Linares** 2004; **Quiroz & Jaramillo** 2009; **sanchez-Villagra & Aguilera** 2006). Aun no existe información sobre los Llanos Orientales aparte del Cuaternario (**Wijmstra & Van der Hammen** 1966), aunque las floras del Mioceno inferior indican que la región no era una sabana (**Jaramillo et al.**, 2006). Así que el cambio y expansión de las sabanas en el norte de Suramérica tuvo que ser muy reciente, al menos en los últimos 9 Ma.

Qué factores podrían haber inducido la expansión de las sabanas en el neotrópico? La cantidad de precipitación así como su estacionalidad determinan en gran medida la presencia de sabanas (**Lehmann et al.**,

2011). La precipitación a macroescala en Suramérica, a su vez, está controlada por la amplitud y migración de la zona de convergencia intertropical (ZCIT). Cuando ocurre el verano en el hemisferio sur, la ZCIT migra hacia el sur y se posiciona sobre el sur de Colombia, Ecuador y la cuenca Amazónica (Poveda *et al.*, 2006), dejando grandes porciones del norte de Suramérica bajo condiciones secas. La precipitación se incrementa en la parte superior de la cuenca Amazonia, Orinoco, Guayanas, Colombia y el istmo centroamericano cuando la ZCIT migra hacia el norte durante el verano en el hemisferio norte (Poveda *et al.*, 2006). Esto resulta en un ciclo unimodal de la precipitación sobre la costa Caribe y los llanos orientales de Colombia y Venezuela. Variaciones en la amplitud y migración de la ZCIT traería como consecuencia una variación al ciclo de precipitación sobre las sabanas neotropicales. Dos mecanismos que afectan la ZCIT han sido propuestos 1. El cierre del istmo de Panamá incrementó la intensidad de la circulación termohalina, haciendo que la ZCIT migrara hacia el sur durante el Plioceno inferior (5-3 Ma) a su posición actual (Billups *et al.*, 1999; Chaisson 1995; Chaisson & Ravelo 1997; Haug *et al.*, 2001; Haug & t iedemann 1998; Hovan 1995; Keigwin 1982; Mikolajewicz *et al.*, 1993). 2. El comienzo de la glaciación en el hemisferio norte a 2.7 Ma habría modificado la posición del ZCIT haciendo que migrara hacia el sur hasta su posición actual (Chiang & Bitz 2005; Flohn 1981; Shackleton *et al.*, 1984).

Otro elemento adicional que pudo haber influido en la expansión de las sabanas, es el levantamiento de los Andes. Modelos de sensibilidad climática (sepulchre *et al.*, 2010) indican que el levantamiento de los Andes del norte a elevaciones mayores a 2000 metros, aumentó la estacionalidad en toda la región norte de Suramérica y podría haber facilitado la expansión de las sabanas neotropicales. Algo similar ocurrió en el sur de Suramérica, donde la precipitación del Pacífico se detiene en el costado occidental de los Andes incrementando la aridez en la Patagonia (sepulchre *et al.*, 2010). Modelos de sensibilidad climática también han mostrado que el levantamiento de los Andes centrales por encima de 2500 m pudo haber intensificado la corriente de Humboldt (sepulchre *et al.*, 2009). Esta corriente juega un papel importante en la regulación de la profundidad de la termoclina y de la temperatura superficial oceánica en el Pacífico oriental, retroalimentando la diferencia de temperatura superficial entre el Pacífico oriental y occidental. Cambios en la intensidad de la corriente de Humboldt y/o en la profundidad de la

termoclina en el Pacífico tropical generan variaciones en la distribución e intensidad de las celdas de convección atmosféricas (circulación de Walker y Hadley), afectando la posición latitudinal e intensidad de la ZCIT sobre el Pacífico oriental (Chiang 2009; Martínez 2009; Rincón-Martínez *et al.*, 2010).

El levantamiento de los Andes también produjo grandes modificaciones en el paisaje, mientras que la mayoría del flujo hídrico se dirigía hacia el norte durante la mayor parte del Cenozoico, el levantamiento fuerte de los Andes hace 7-4 Ma, ocasionó que la dirección del sistema hidrográfico se modificara hacia la región oriental de Suramérica, con el surgimiento de los sistemas hídricos del Amazonas y Orinoco (Figueiredo *et al.*, 2009; Hoorn 1994a, b; Hoorn *et al.*, 1995; Hoorn *et al.*, 2010b; Jaramillo *et al.*, 2010a). El levantamiento también produjo una modificación sustancial en los patrones de subsidencia en las cuencas amazónicas, donde en muchos lugares se detuvo e incluso se produjo un leve rebote isostático. Esto hizo que el sistema hídrico cambiara de extensas planicies inundables durante la mayor parte del Cenozoico, a ríos que están erodando su propio cauce y posee planos inundables muy reducidos (Latrubesse *et al.*, 2010). Hoy en día, sólo el 20% de la región amazónica son planos inundables (toivonen *et al.*, 2007), pero durante el Mioceno, esta extensión fue mucho más amplia, lo que posibilitó la existencia de grandes reptiles y mamíferos como grandes tortugas de casi 3 metros de largo (*Stupendemys*), cocodrilos de más de 14 metros de largo (*Purussaurus*), y roedores (*Phoberomys*) de más de 1.8 metros y 700 kilos de peso (Antoine *et al.*, 2007; Cozzuol 2006; Frailey 1986; Kay *et al.*, 1997; Sanchez-Villagra & Aguilera 2006; Sanchez-Villagra *et al.*, 2003; Sánchez-Villagra 2006). La desaparición de estos grandes planos inundables probablemente produjo la extinción de esta fauna y flora diversa pero dependiente de los mencionados planos.

El levantamiento de los Andes también generó una gran cantidad de hábitats de alturas que no existían antes, como los páramos y bosques de nieblas. En términos generales, la vegetación de los Andes tropicales proviene en un 50% de especies que derivaron de plantas de tierras bajas tropicales, ~25% de plantas que migraron desde latitudes altas en Suramérica y ~25% de plantas que migraron desde latitudes altas en Suramérica (Gentry 1982a, b). Sus laderas, además, han sido consideradas como un motor de especiación, ya que se generaron una multitud de microambientes

derivados de la complejidad topográfica de los Andes (**Gentry** 1982a; **Hoorn et al.**, 2010b). La historia de la vegetación de los Andes ha sido estudiada por el profesor Van der Hammen y su grupo por más de cuatro décadas (**Hooghiemstra & Van der Hammen** 1998; **Hooghiemstra et al.**, 2006; **Van der Hammen** 1989; **Van der Hammen** 1995, 2003; **Van der Hammen & Hooghiemstra** 2000; **Van der Hammen et al.**, 1973; **Wijninga** 1996).

Existe una gran controversia sobre los ambientes que dominaron las tierras bajas del neotrópico, especialmente la Amazonia occidental, durante el Mioceno/Plioceno (**Campbell et al.**, 2006; **Campbell et al.**, 2000; **Campbell et al.**, 2001; **Frailey et al.**, 1988; **Gross et al.**, 2011; **Hoorn** 1993, 1994a, b; **Hoorn et al.**, 2010a; **Hoorn et al.**, 2010b; **Hoorn et al.**, 2011; **Hovikoski et al.**, 2007a; **Hovikoski et al.**, 2007b; **Hovikoski et al.**, 2008; **Hovikoski et al.**, 2005; **Latrubesse et al.**, 1997; **Latrubesse et al.**, 2010; **Latrubesse et al.**, 2007; **Räsänen et al.**, 1995; **Rasanen et al.**, 1990; **Räsänen et al.**, 1987; **Rebata-H. et al.**, 2006a; **Rebata-H. et al.**, 2006b; **Roddaz et al.**, 2005; **Roddaz et al.**, 2006; **Roddaz et al.**, 2010; **silva et al.**, 2010; **uba et al.**, 2009; **uba et al.**, 2005; **Vermeij & Wesselingh** 2002; **Vonhof et al.**, 2003; **Webb** 1996; **Wesselingh & salo** 2006; **Wesselingh** 2006a, b; **Westaway** 2006). Algunos han propuesto que existió un extenso mar epicontinental conectando Paraná con el Caribe, otros sugieren un lago de agua dulce de extensión continental que cubrió la Amazonia durante varios millones de años y otros, por el contrario, indican que no existieron lagos o mares, sino extensos planos de inundación de múltiples ríos. Gran parte de esta controversia radica en la naturaleza extremadamente condensada del registro litológico del Neógeno en la Amazonia. Alrededor de 300 metros estratigráficos representan los últimos 20 Ma, lo cual indica una muy baja tasa de subsidencia y/o generación de espacio de acomodación, dada la gran cantidad de sedimentos que los ríos de la Amazonia pueden transportar. Ya que muy poco tiempo geológico quedó registrado en la roca, debe haber múltiples hiatos difíciles de datar, evaluar y determinar. A esto se suma la poca inclinación de los estratos en la región y la escasa disponibilidad de afloramientos, lo cual hace posible que solo los 30-50 metros estratigráficos del tope de la secuencia Neógena expuestos en las laderas de los ríos durante las épocas secas sean susceptibles de ser estudiados y donde la gran mayoría de los estudios citados anteriormente han sido realizados. La gran parte del sedimento del Neógeno en la Ama-

zonía está en el subsuelo y sin la ayuda de núcleos de roca o pozos profundos, es imposible de ser estudiado. Una posible alternativa para resolver este dilema sería el estudio de las cuencas del borde de los Andes en Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela, las cuales poseen un espeso registro estratigráfico del Neógeno (**Bayona et al.**, 2008; **Hungerbühler et al.**, 2002; **Kummel** 1948; **Mora et al.**, 2010; **Parra et al.**, 2010; **Quiroz & Jaramillo** 2009; **Rivadeneira & Baby** 1999; **stainforth** 1955; **tschopp** 1953), en algunos casos llegando a 9000 metros de sedimentos (**Quiroz & Jaramillo** 2009), donde es mucho más factible entender la dinámica de las posibles inundaciones de Suramérica durante el Neógeno.

El último gran cambio en la historia neotropical ocurrió hace 3.5 Ma (Plioceno) con la conexión terrestre constante del istmo de Panamá con Suramérica. Hoy en día, la mitad de los mamíferos de Suramérica provienen de orígenes norteamericanos. A esta gran migración de mamíferos de norte a sur América y viceversa se le ha llamado el "gran intercambio biótico americano" (**MacFadden** 2006; **simpson** 1983; **Webb** 1976, 1978, 1994; **Webb** 1996; **Webb** 2006; **Woodburne** 2010). Existen muy pocos sitios en el neotrópico que documenten este fenómeno y la mayoría de información al respecto proviene del Plioceno de Argentina y Chile donde hay excelente exposiciones de rocas y una fuerte tradición de investigación paleontológica. En las plantas, el intercambio fue asimétrico; muchas plantas de tierras bajas migraron hacia Centroamérica, mientras que plantas de Norteamérica lo hicieron hacia las tierras altas de los Andes, como *Alnus* (aliso) que alcanzó los Andes hace 1 Ma y *Quercus* (roble) que alcanzó los Andes hace 330.000 años (**Van der Hammen & Hooghiemstra** 1997). La migración de las plantas empezó mucho antes que los mamíferos pues ya para el Mioceno medio (15 Ma), numerosas plantas suramericanas ya se habían establecido en la porción más occidental de Centroamérica cercana al Canal de Panamá (**Cody et al.**, 2010; **Herrera et al.**, 2010). La forma como estas migraciones de plantas fueron afectadas o facilitadas por los grandes cambios del paisaje y la extensión de las sabanas de los últimos 6-8 Ma mencionadas arriba es aun un tópico sin resolver.

El desarrollo de las comunidades de plantas en las zonas bajas neotropicales a lo largo del tiempo geológico ha sido afectado por una serie de accidentes históricos, cambios climáticos a escalas cortas y largas junto con procesos tectónicos que han creado montañas y

unido continentes. La vegetación actual es producto de la suma de todos estos factores, los cuales necesitamos estudiar para entender por qué los trópicos son tan diversos y cómo responderán a los cambios climáticos en un futuro cercano.

## Agradecimientos

Nuestros estudios han sido financiados por el Instituto Smithsonian, Instituto Colombiano del Petróleo-Ecopetrol S.A., el Fondo para la Investigación de la Ciencia y la Tecnología del Banco de la República, USA National Science Foundation, Carbones del Cerrejón LLC., Autoridad del Canal de Panamá, Mark Tupper, Ricardo Pérez S.A., National Geographic, Smithsonian Women's Committee, Agencia Nacional de Hidrocarburos, y la Corporación Geológica Ares. Un agradecimiento especial a M. I. Barreto por su colaboración en diversas áreas, A. Jaramillo por la revisión de este manuscrito y D. Rincón por sus sugerencias climáticas.

## ReFeRen CIAs

- Aber, J., Neilson, R., McNulty, S., Lenihan, J. M., Bachelet, D., and Draper, R. J.** 2001. Forest Processes and Global Environmental Change: Predicting the Effects of Individual and Multiple Stressors. *BioScience* 51, 735-751.
- Aguilera, O.** 2004. Tesoros Paleontológicos de Venezuela, Urumaco, Patrimonio Natural de la Humanidad. Editorial Arte, 148.
- Anderson, J. B., Warny, S., Askin, R. A., Wellner, J. S., Bohaty, S. M., Kirshner, A. E., Livsey, D. N., Simms, A. R., Smith, T. R., Ehrmann, W., Lawver, L. A., Barbeau, D., Wise, S. W., Kulhenek, D. K., Weaver, F. M., and Majewski, W.** 2011. Progressive Cenozoic cooling and the demise of Antarctica's last refugium. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Antoine, P.-O., Salas-Gismondi, R., Baby, P., Benammi, M., Brusset, S., Franceschi, D., Espurt, N., Goillot, C., Pujos, F., Tejada, J., and Urbina, M.** 2007. The Middle Miocene (Laventan) Fitzcarrall Fauna, Amazonian Peru. *Cuadernos del Museo Geominero* 8, 19-24.
- Arakaki, M., Christin, P.-A., Nyffeler, R., Lendel, A., Eggli, U., Ogburn, R. M., Spriggs, E., Moore, M. J., and Edwards, E. J.** 2011. Contemporaneous and recent radiations of the world's major succulent plant lineages. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 8379-8384.
- Archangelsky, S., and Taylor, T. N.** 1993. The ultrastructure of in situ Clavatipollenites pollen from the early Cretaceous of Argentina. *American Journal of Botany* 80, 879-885.
- Archer, D., Eby, M., Brovkin, V., Ridgwell, A., Cao, L., Mikolajewicz, G., Montenegro, A., and Tokos, K.** 2009. Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 37, 117-134.
- Bassow, S. L., McConnaughey, K. D., and Bazzaz, F. A.** 1994. The Response of Temperate Tree Seedling Grown in Elevated CO<sub>2</sub> to Extreme Temperature Events. *Ecological Applications* 4, 593-603.
- Bayona, G., Cortés, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J., and Reyes-Harker, A.** 2008. An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous-Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. *Geological Society of America Bulletin* 120, 1171-1197.
- Bayona, G., Montes, C., Cardona, A., Jaramillo, C., Ojeda, G., and Valencia, V.** 2011. Intraplate basin response to oceanic-arc collision and subsequent subduction-related continental magmatism; a case from the southern Caribbean-South America plate margin. *Basin Research* 23, 403-422.
- Bell, C. D., Soltis, D. E., and Soltis, P. S.** 2010. The age and diversification of the Angiosperms re-visited. *American Journal of Botany* 97, 1296-1303.
- Berry, J., and Bjorkman, O.** 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* 31, 491-543.
- Bice, K. L., Birgel, D., Meyers, P. A., Dahl, K. A., Hinrichs, K., and Norris, R. D.** 2006. A multiple proxy and model study of Cretaceous upper ocean temperatures and atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Paleoceanography* 21, PA2002.
- Billups, K., Ravelo, A. C., Zachos, J. C., and Norris, R. D.** 1999. Link between oceanic heat transport, thermohaline circulation, and the Intertropical Convergence Zone in the early Pliocene Atlantic. *Geology* 27, 319-322.
- Bowen, G. J., and Zachos, J. C.** 2010. Rapid carbon sequestration at the termination of the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. *Nature Geoscience* 3, 866-869.
- Boyce, C. K., and Lee, J.-e.** 2010. An exceptional role for flowering plant physiology in the expansion of tropical rainforests and biodiversity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 277, 3437-3443.
- Bralower, T. J., Thomas, O. J., Thomas, E., and Zachos, J. C.** 1998. High-resolution records of the Late Paleocene thermal maximum and circum-Caribbean volcanism: Is there a causal link? Reply. *Geology* 26, 671.
- Brenner, G.** 1974. Palynostratigraphy of the Lower Cretaceous Gevar'am and Talme Yafe Formations in the Gevar'am 2 well (Southern coastal plain Israel). *Geological Survey of Israel Bulletin* 59, 1-27.
- Burnham, R. J.** 2009. An overview of the fossil record of climbers: Bejuco, sogas, trepadoras, lianas, cipos and vines. *Revista Brasileira de Paleontologia* 12, 146-160.
- Burnham, R. J., and Graham, A.** 1999. The history of neotropical vegetation: new developments and status. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 86, 546-589.
- Burnham, R. J., and Johnson, K. R.** 2004. South American palaeobotany and the origins of neotropical rainforests. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B Biological Sciences* 359, 1595-1610.
- Cadena, E., and Jaramillo, C.** New Podocnemididae fossil turtles from the late Paleocene Cerrejón formation, Guajira Peninsula, Colombia. in *Proceedings 66th Annual Meeting of the Society of Vertebrate Paleontology*, Ottawa, Canada, 2006.
- Campbell, K. E. J., Frailey, C. D., and Romero Pitman, L.** 2006. The Pan-Amazonian Ucayali peneplain, Late Neogene sedimentation in Amazonia, and the birth of the modern Amazon River system. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 239, 166-219.

- Campbell, K. e. J., Frailey, C. D., and Romero-Pittman, L.** 2000. The late Miocene gomphothere *Amahuacatherium peruvium* (Proboscidea: Gomphotheriidae) from the Amazonian Peru: Implications for the Great American Faunal Interchange. *Ins-tituto Geológico Min Metal* 23, 1–151.
- Campbell, K. e. J., Heizler, M., Frailey, C., Romero-Pitman, L., and Prothero, D. R.** 2001. Upper Cenozoic chronostratigraphy of the southwestern Amazon Basin. *Geology* 29, 595-598.
- Carvalho, M., Herrera, F., Jaramillo, C., Wing, s., and Callejas, R.** 2011. Paleocene Malvaceae from northern South America and their biogeographical implications. *American Journal of Botany* 98, 1337-1355.
- Cernusak, L. A., Winter, K., Martínez, C., Correa, e., Aranda, J., Garcia, M., Jaramillo, C., and turner, B. L.** 2011. Growth and water-use efficiency of legume versus non-legume tropical tree seedlings under elevated [CO<sub>2</sub>]. *Plant Physiology* DOI: 10.1104/pp.111.182436.
- Chaisson, W. P.** 1995. Planktonic foraminiferal assemblages and paleoceanographic change in the transtropical Pacific Ocean. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific results* 38, 555–597.
- Chaisson, W. P., and Ravelo, A. C.** 1997. Changes in upper water-column structure at Site 925, late Miocene–Pleistocene: Planktonic foraminifer assemblage and isotopic evidence. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific results* 154, 255–268.
- Chiang, J. C. H.** 2009. The Tropics in Paleoclimate. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 37, 263-297.
- Chiang, J. C. H., and Bitz, C. M.** 2005. Influence of high latitude ice cover on the marine Intertropical Convergence zone. *Climate Dynamics* 25, 477-496.
- Clyde, W. C., and Gingerich, P. D.** 1998. Mammalian community response to the latest Paleocene thermal maximum: An isotaphonomic study in the northern Bighorn Basin, Wyoming. *Geology* 26, 1011-1014.
- Cody, s., Richardson, J. e., Rull, V., ellis, C., and Pennington, e. t.** 2010. The Great American Biotic Interchange revisited. *Ecography* 33, 326-332.
- Correa, e., Jaramillo, C., Manchester, s., and Gutierrez, M.** 2010. A fruit and leaves of Rhamnaceae affinities from the late Cretaceous (Maastrichtian) of Colombia. *American Journal of Botany* 97, 10.3732/ajb.0900093.
- Cozzuol, M.** 2006. The Acre vertebrate fauna: diversity, geography and time. *Journal of South American Earth Sciences* 21, 185-203.
- Crane, P. R., and Lidgard, s.** 1989. Angiosperm diversification and paleolatitudinal gradients in Cretaceous floristic diversity. *Science* 246, 675-678.
- . 1990. Angiosperm radiation and patterns of Cretaceous palynological diversity. in Taylor, P. D., and Larwood, G. P., eds., *Major Evolutionary Radiations*, Volume 42: Oxford, Clarendon Press, p. 377-407.
- Currano, e. D., Wilf, P., Wing, s. L., Labandeira, C. C., Lovelock, e. C., and Royer, D. L.** 2008. Sharply increased insect herbivory during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 1960-1964.
- Davis, C., Webb, C. O., Wurdack, K. J., Jaramillo, C., and Donoghue, M. J.** 2005 Explosive radiation of Malpighiales supports a mid-Cretaceous origin of Modern Tropical Rain Forests. *American Naturalist* 165, E36-E65.
- De Boer, H. J., Lammertsma, e. I., Wagner-Cremer, F., Dilcher, D. L., Wassen, M. J., and Dekker, s. C.** 2011. Climate forcing due to optimization of maximal leaf conductance in subtropical vegetation under rising CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 4041-4046.
- De la Parra, F.** 2009. Palynological changes across the Cretaceous-Tertiary boundary in Colombia, South America [Ms: University of Florida], 65.
- De la Parra, F., Jaramillo, C., and Dilcher, D.** 2008a. Paleoeological changes of spore producing plants through the Cretaceous-Paleocene boundary in Colombia. *Palynology* 32, 258-259.
- De la Parra, F., Jaramillo, C., Rueda, M., and Dilcher, D.** Has there been a plant mass extinction in the last 70 million years in the Neotropics? . in *Proceedings 12th International Palynological Congress (IPC-XII 2008)*, Bonn, Germany, 2008b, Terra Nostra, 59.
- Díaz de Gamero, M. L., and Linares, O. J.** Estratigrafía y paleontología de la Formación Urumaco, del Mioceno tardío de Falcón noroccidental. in *Proceedings VII Congreso Geológico Venezuela 1989*, Volume 1, 419-439.
- Dickens, G. R.** 1998. High-resolution records of the Late Paleocene thermal maximum and circum-Caribbean volcanism: Is there a causal link? *Comment. Geology* 26, 670.
- Dickens, G. R., O'neil, J. R., Rea, D. K., and Owen, R. M.** 1995. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene. *Paleoceanography* 10, 965-971.
- Doria, G., Jaramillo, C., and Herrera, F.** 2008. Menispermaceae from the Cerrejón formation, middle to late Paleocene. *American Journal of Botany* 95, 954-973.
- Doyle, J., Hotton, C., and Ward, J.** 1990. Early Cretaceous tetrads, zonosulculate pollen, and Winteraceae. I. Taxonomy, morphology, and ultrastructure. *American Journal of Botany* 77, 1544-1557.
- Doyle, J. A., Biene, P., Doerenkamp, A., and Jardine, s.** 1977. Angiosperm pollen from the pre-Albian Lower Cretaceous of Equatorial Africa. *Bulletin Des Centres De Recherches Exploration–Production Elf–Aquitaine* 1, 451-473.
- Doyle, J. A., and Hickey, L. J.** 1976. Pollen and leaves from the Mid-Cretaceous Potomac group and their bearing on early angiosperm evolution. in Beck, C. B., ed., *Origin and Early Evolution of Angiosperms*. Columbia University Press, 129-206.
- edwards, e. J., Osborne, C. P., stromberg, C. A. e., smith, s. A., Bond, W. J., Christin, P. A., Cousins, A. B., Duvall, M. R., Fox, D. L., Freckleton, R. P., Ghannoum, O., Hartwell, J., Huang, Y., Janis, C. M., Keeley, J. e., Kellogg, e. A., Knapp, A. K., Leakey, A. D. B., nelson, D. M., saarela, J. M., sage, R. F., sala, O. e., salamin, n., still, C. J., and t ipple, B.** 2010. The Origins of C<sub>4</sub> Grasslands: Integrating Evolutionary and Ecosystem Science. *Science* 328, 587-591.
- erwin, D. H.** 2008. *Extinction! How Life Nearly Ended 250 Million Years ago*. Princeton University Press.
- Feild, t. s., Brodribb, t. J., Iglesias, A., Chatelet, D. s., Baresh, A., upchurch, G. R., Gomez, B., Mohr, B. A. R., Coiffard, C., Kvaček, J., and Jaramillo, C.** 2011a. Fossil evidence for Cretaceous escalation in angiosperm leaf vein evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 8363-8366.
- Feild, t. s., upchurch, G. R., Chatelet, D. s., Grubbs, K. C., samain, M.-s., and Wanke, s.** 2011b. Fossil evidence for low gas exchange capacities for Early Cretaceous angiosperm leaves. *Paleobiology* 37, 195-213.

- Figueiredo, J., Hoorn, C., van der Ven, P., and Soares, E.** 2009. Late Miocene onset of the Amazon River and the Amazon deep-sea fan: Evidence from the Foz do Amazonas Basin. *Geology* 37, 619-622.
- Filippelli, G. M., and Flores, J.-A.** 2009. From the warm Pliocene to the cold Pleistocene: A tale of two oceans. *Geology* 37, 959-960.
- Fine, P. V., and Ree, R. H.** 2006. Evidence for a Time-Integrated Species-Area Effect on the Latitudinal Gradient in Tree Diversity. *The American Naturalist* 168, 796-804.
- Fine, P. V. A., Ree, R. H., and Burnham, R. J.** 2008. Disparity in Tree Species Richness Between Tropical, Temperate and Boreal Biomes: The Geographic Area and Age Hypothesis. In Carson, W. P., and Schnitzer, S. A., eds., *Tropical Forest Community Ecology*. Blackwell Scientific, 31-45.
- Flohn, H.** 1981. A hemispheric circulation asymmetry during late Tertiary. *Geologische Rundschau* 70, 725-736.
- Frailey, C., Lavina, E., Rancy, A., and Souza-Filho, J. P.** 1988. A proposed Pleistocene/Holocene lake in the Amazon basin and its significance to Amazonian Geology and biogeography. *Acta Amazónica* 18, 119-143.
- Frailey, C. D.** 1986. Late Miocene and Holocene mammals, exclusive of the Notoungulata, of the Rio Acre region, western Amazonia. *Contrib Sci Nat Hist Mus Los Angeles Co* 374, 1-46.
- García, C.** 1958. Investigación Palinológica de la formación Guaduas del anticlinal de Guachetá-Lenguazaque-Tausa. *Boletín de Geología UIS* 2, 27-31.
- Gaston, K. J.** 2000. Global patterns in biodiversity. *Nature* 405, 220-227.
- Gentry, A. H.** 1982a. Neotropical floristic diversity: phytogeographical connections between Central and South America, Pleistocene climatic fluctuations, or an accident of the Andean orogeny? *Annals of the Missouri Botanical Garden* 69, 557-593.
- . 1982b. Patterns of neotropical plant species diversity. *Evolutionary Biology* 15, 1-84.
- Gingerich, P. D.** 2006. Environment and evolution through the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Trends in Ecology and Evolution* 21, 246-253.
- Gomez, N., Jaramillo, C., Herrera, F., Wing, S. L., and Callejas, R.** 2009. Palms (Arecaceae) from a Paleocene rainforest of northern Colombia. *American Journal of Botany* 96, 1300-1312.
- Gonzalez, H.** 1977. Flora de la formación Valle Alto - Jurásico - en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 2, 107-122.
- Graham, A.** 2011. The age and diversification of terrestrial New World ecosystems through Cretaceous and Cenozoic time. *American Journal of Botany* 98, 336-351.
- Gross, M., Piller, W. E., Ramos, M. I., and Douglas, J.** 2011. Late Miocene sedimentary environments in south-western Amazonia (Solimões Formation; Brazil). *Journal of South American Earth Science*.
- Gutierrez, M., and Jaramillo, C.** 2007. Maastrichtian paleotemperature and paleoprecipitation from the Guaduas Formation, Colombia. *Palynology* 32, 260.
- Haffer, J.** 1969. Speciation in Amazonian Birds. *Science* 165, 131-137.
- Hambalek, N.** 1993. Palinoestratigrafía del Mioceno-Plioceno de la región de Urumaco, Falcon Noroccidental [Undergraduate: Universidad Central de Venezuela, 162.
- Hambalek, N., Rull, V., De Digiaco, E., and Diaz de Gamero, M. L.** 1994. Evolución paleoecológica y paleoambiental de la secuencia del Neógeno en el surco de Urumaco. *Estudio palinológico y litológico*. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geología 191, 7-19.
- Haq, B. U., Hardenbol, J., and Vail, P. R.** 1988. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level changes. In Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C., Posamentier, H. W., Ross, C. A., and Van Wagoner, J. C., eds., *Sea Level Changes: An Integrated Approach*. SEPM, 72-108.
- Hasting, A., Bloch, J., Cadena, E., and Jaramillo, C.** 2010. A new small short-snouted Dyrosaurid (Crocodylomorpha, Mesoeucrocodylia) from the Paleocene of northeastern Colombia. *Journal of Vertebrate Paleontology* 30, 139-162.
- Hasting, A., Bloch, J., and Jaramillo, C.** 2011. A new longirostrine dyrosaurid (Crocodylomorpha, Mesoeucrocodylia) from the Paleocene of north-eastern Colombia: biogeographic and behavioral implications for New World Dyrosauridae. *Palaeontology* In press.
- Haug, G., Hughen, K. A., Sigman, D. N., Peterson, L. C., and Röhl, U.** 2001. Southward Migration of the Intertropical Convergence Zone Through the Holocene. *Science* 293, 1304-1308.
- Haug, G. H., and Tiedemann, R.** 1998. Effect of the formation of the Isthmus of Panama on Atlantic Ocean thermohaline circulation. *Nature* 393, 673-676.
- Head, J., Bloch, J., Hasting, A., Bourque, J., Cadena, E., Herrera, F., Polly, P. D., and Jaramillo, C.** 2009a. Giant Boine Snake From A Palaeocene Neotropical Rainforest Indicates Hotter Past Equatorial Temperatures. *Nature* 457, 715-718.
- Head, J., Bloch, J., Hasting, A., Bourque, J., Cadena, E., Herrera, F., Polly, P. D., and Jaramillo, C.** 2009b. Reply: Giant Boine Snake From A Palaeocene Neotropical Rainforest Indicates Hotter Past Equatorial Temperatures. *Nature* 460, E4-E5.
- Herngreen, G. F. W., and Dueñas, H.** 1990. Dating of the Cretaceous Une Formation, Colombia and the relationship with the Albian-Cenomanian African-South American microfossil province. *Review of Palaeobotany and Palynology* 66, 345-359.
- Herngreen, G. F. W., Kedves, M., Rovnina, L. V., and Smirnova, S. B.** 1996. Cretaceous palynoflora provinces: a review. In Janonius, J., and McGregor, D. C., eds., *Palynology: principles and applications*. American Association of Stratigrapher Palynologists, 1157-1188.
- Herrera, F., Jaramillo, C., Dilcher, D., Wing, S. L., and Gomez, C.** 2008. Fossil Araceae from a Paleocene neotropical rainforest in Colombia. *American Journal of Botany* 95, 1-16.
- Herrera, F., Manchester, S., Jaramillo, C., MacFadden, B., and Silva, S.** 2010. Phytogeographic History and Phylogeny of the Humiriaceae. *International Journal of Plant Sciences* 171, 392-408.
- Hooghiemstra, H., and Van der Hammen, T.** 1998. Neogene and Quaternary development of the neotropical rain forest: The forest refugia hypothesis, and a literature overview. *Earth-Science Reviews* 44, 147-183.
- Hooghiemstra, H., Wijninga, V. M., and Cleef, A. M.** 2006. The Paleobotanical Record of Colombia: Implications for Biogeography and Biodiversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 93, 297-325.
- Hoorn, C.** 1993. Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of northwestern

- Amazonia: results of a palynostratigraphic study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 105, 267-309.
- . 1994a. An environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (Middle-Late Miocene, NW Amazonia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 112, 187-238.
- . 1994b. Fluvial palaeoenvironments in the intracratonic Amazonas Basin (Early Miocene-early Middle Miocene, Colombia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 109, 1-54.
- Hoorn, C., Guerrero, J., Sarmiento, G. A., and Lorente, M. A.** 1995. Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology* 23, 237-240.
- Hoorn, C., Wesselingh, F., Hovikoski, J., and Guerrero, J.** 2010a. The development of the Amazonian mega-wetland (Miocene; Brazil, Colombia, Peru, Bolivia). in Hoorn, M. C., and Wesselingh, F. P., eds., *Amazonia, Landscape and Species Evolution*. Blackwell, 123-142.
- Hoorn, C., Wesselingh, F., Steege, H. t., Mora, A., Sevink, J., Sanmartín, I., Sánchez-Meseguer, A., Anderson, C. L., Figueiredo, J., Jaramillo, C., Riff, D., Negri, F. R., Hooghiemstra, H., Lundberg, J. G., Stadler, T., Sarkinen, T., and Antonelli, A.** 2010b. Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution and biodiversity. *Science* 331, 399-400.
- Hoorn, C., Wesselingh, F. P., Steege, H. t., Bermudez, M. A., Mora, A., Sevink, J., Sanmartín, I., Sánchez-Meseguer, A., Anderson, C. L., Figueiredo, J. P., Jaramillo, C., Riff, D., Negri, F. R., Hooghiemstra, H., Lundberg, J., Stadler, T., Sarkinen, T., and Antonelli, A.** 2011. Origins of Biodiversity—Response. *Science* 331, 399-400.
- Hotton, C. L.** 2002. Palynology of the Cretaceous-Tertiary boundary in Central Montana: Evidence for extraterrestrial impact as a cause of the terminal Cretaceous extinctions. in Hartman, J. H., Johnson, K. R., and Nichols, D. J., eds., *The Hell Creek Formation and the Cretaceous-Tertiary Boundary in the Northern Great Plains: An integrated Continental Record of the end of the Cretaceous*. Geological Society of America, 473-502.
- Hovan, S.** 1995. Late Cenozoic atmospheric circulation intensity and climate history recorded by eolian deposition in the eastern equatorial Pacific Ocean, Leg 138. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific results*. 138, 615-625.
- Hovikoski, J., Gingras, M., Rasanen, M., Rebata, L. A., Guerrero, J., Ranzi, A., Melo, J., Romero, L., del Prado, H. n., Jaimes, F., and Lopez, S.** 2007a. The nature of Miocene Amazonian epicontinental embayment: High-frequency shifts of the low-gradient coastline. *Geological Society of America Bulletin* 119, 1506-1520.
- Hovikoski, J., Rasanen, M., Gingras, M., Lopez, S., Romero, L., Ranzi, A., and Melo, J.** 2007b. Palaeogeographical implications of the Miocene Quendque Formation (Bolivia) and tidally-influenced strata in southwestern Amazonia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 243, 23-41.
- Hovikoski, J., Rasanen, M., Gingras, M., Ranzi, A., and Melo, J.** 2008. Tidal and seasonal controls in the formation of Late Miocene inclined heterolithic stratification deposits, western Amazonian foreland basin. *Sedimentology* 55, 499-530.
- Hovikoski, J., Rasanen, M., Gingras, M., Roddaz, M., Brusset, S., Hermoza, W., Pittman, L. R., and Lertola, K.** 2005. Miocene semidiurnal tidal rhythmites in Madre de Dios, Peru. *Geology* 33, 177 - 180.
- Huber, B. t., Hodell, D. A., and Hamilton, C. P.** 1995. Mid- to Late Cretaceous climate of the southern high latitudes: Stable isotopic evidence for minimal equator to-pole thermal gradients. *Geological Society of America Bulletin* 107, 1164-1191.
- Huber, B. t., MacLeod, K. G., Gröcke, D., and Kucera, M.** 2011. Paleotemperature and paleosalinity inferences and chemostratigraphy across the Aptian/Albian boundary in the subtropical North Atlantic. *Paleoceanography* in press.
- Huber, B. t., Norris, R. D., and MacLeod, K. G.** 2002. Deep sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous. *Geology* 30, 123-126.
- Huber, M.** 2008. A Hotter Greenhouse? *Science* 321, 353-354.
- . 2009. Snakes tell a torrid tale. *Nature* 457, 669-671.
- Huber, M., and Caballero, R.** 2011. The early Eocene equable climate problem revisited. *Climate of the Past Discussions* 7, 241-304.
- Huber, M., and Sloan, L. C.** 1999. Warm climate transitions: A general circulation modeling study of the Late Paleocene Thermal maximum (~56 Ma). *Journal of Geophysical Research* 104, 16633-16655.
- . 2000. Climatic responses to tropical sea surface temperature changes on a "greenhouse" Earth. *Paleoceanography* 15, 443-450.
- Huber, M., Sloan, L. C., and Shellito, C.** 2003. Early Paleogene oceans and climate: a fully coupled modeling approach using the NCAR CCSM. in Wing, S. L., Gingerich, P. D., Schmitz, B., and Thomas, E., eds., *Causes and Consequences of early Paleogene Warm Climates*. GSA, 25-47.
- Huertas, G.** 2003. Flora Fósil de Villa de Leyva y sus alrededores. Editorial Linotipia Bolívar, 151.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egúez, A., Peterson, D. e., Helog, U., and Hammer, C.** 2002. Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews* 57, 75-124.
- Jablonski, D.** 1993. The tropics as a source of evolutionary novelty through geological time. *Nature* 364, 142-144.
- Jacobs, B., Kingston, J., and Jacobs, L.** 1999. The Origin of Grass-Dominated Ecosystems. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 86, 590-643.
- Jacques, F. M., Wang, W., Ortiz, R., Li, H.-L., Zhou, Z.-H., and Chen, Z.** 2011. Integrating fossils in a molecular-based phylogeny and testing them as calibration points for divergence time estimates in Menispermaceae. *Journal of Systematics and Evolution* 49, 25-49.
- Jaramillo, C., Hoorn, C., Silva, S., Leite, F., Herrera, F., Quiroz, L., Dino, R., and Antonioli, L.** 2010a. The origins of the modern Amazon rainforest: Implications from the palynological and paleobotanical record. in Hoorn, M. C., and Wesselingh, F. P., eds., *Amazonia, Landscape and Species Evolution*. Blackwell, 317-334.
- Jaramillo, C., Ochoa, D., Contreras, L., Pagani, M., Carvajal-Ortiz, H., Pratt, L. M., Krishnan, S., Cardona, A., Romero, M., Quiroz, L., Rodriguez, G., Rueda, M., De la Parra, F., Moron, S., Green, W., Bayona, G., Montes, C., Quintero, O., Ramirez, R., Mora, A., Schouten, S., Bermudez, H., Navarrete, R. e., Parra, F., Alvaran, M., Osorno, J., Crowley, J. L., Valencia, V., and Vervoort, J.** 2010b. Effects of Rapid Global Warming at the Paleocene-Eocene Boundary on Neotropical Vegetation. *Science* 330, 957-961.

- Jaramillo, C., Pardo-t rujillo, A., Rueda, M., Harrington, G., Bayona, G., torres, V., and Mora, G. 2007. Palynology of the Upper Paleocene Cerrejón Formation, northern Colombia. *Palynology* 31, 153-189.
- Jaramillo, C., Rueda, M., and Mora, G. 2006. Cenozoic Plant Diversity in the Neotropics. *Science* 311, 1893-1896.
- Kay, R. F., Madden, R. H., Cifelli, R. L., and Flynn, J. J. 1997. Vertebrate Paleontology in the Neotropics. The Miocene Fauna of La Venta, Colombia. Smithsonian Institution Press, 592.
- Keigwin, L. D. 1982. Isotope paleoceanography of the Caribbean and east Pacific: Role of Panama uplift in late Neogene time. *Science* 217, 350-353.
- Kemp, e. M. 1968. Probable angiosperm pollen from the British Barremian to Albian strata. *Palaeontology* 11, 421-434.
- Kennett, J. P., and stott, L. D. 1991. Abrupt deep-sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene. *Nature* 353, 225-229.
- Krause, G. H., Winter, K., Krause, B., Jahns, P., Garcia, M., Aranda, J., and Virgo, A. 2010. High-temperature tolerance of a tropical tree, *Ficus insipida*: methodological reassessment and climate change considerations. *Functional Plant Biology* 37.
- Kummel, B. 1948. Geological reconnaissance of the Contamana region, Peru. *Geological Society of America Bulletin* 59, 1217-1266.
- Lammertsma, e. I., Boer, H. J., Dekker, s. C., Dilcher, D. L., Lotter, A. F., and Wagner-Cremer, F. 2011. Global CO<sub>2</sub> rise leads to reduced maximum stomatal conductance in Florida vegetation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 4035-4040.
- Latrubesse, e. M., Bocquentin, J., santos, C. R., and Ramonell, C. G. 1997. Paleoenvironmental model for the late Cenozoic southwestern Amazonia: paleontology and geology. *Acta Amazonica* 27, 103-118.
- Latrubesse, e. M., Cozzuol, M., silva-Caminha, s. A. F. d., Rigsby, C. A., Absy, M. L., and Jaramillo, C. 2010. The Late Miocene paleogeography of the Amazon Basin and the evolution of the Amazon River system. *Earth Science Reviews* 99, 99-124.
- Latrubesse, e. M., silva, s., Cozzuol, M., and Absy, M. 2007. Late Miocene continental sedimentation in southwestern Amazonia and its regional significance: Biotic and geological evidence. *Journal of South American Earth Sciences* 23, 61-80.
- Lehmann, C. e., Archibald, s. A., Hoffmann, W. A., and Bond, W. J. 2011. Deciphering the distribution of the savanna biome. *New Phytologist* 191, 197-209.
- Leigh, e. G., Davider, P., Dick, C., Puyravaud, J., terborgh, J., ter-steegen, H., and Wright, s. 2004. Why Do Some Tropical Forest Have So Many Species of Trees? *Biotropica* 36, 447-473.
- Leighton, L. R. 2005. The latitudinal diversity gradient through deep time: testing the "Age of the Tropics" hypothesis using Carboniferous productidine brachiopods. *Evolutionary Ecology* 19, 563-581.
- Lemoigne, Y. 1984. Données nouvelles sur la paleoflore de Colombie. *Géobios* 17, 667-690.
- Lerdau, M., t., and t hroop, H., L. 1999. Isoprene Emissions and Photosynthesis in a Tropical Forest Canopy: Implications for Model Development. *Ecological Applications* 109, 1109- 1117.
- Lewis, s. L., Malhi, Y., and Phillips, O. L. 2004. Fingerprinting the impacts of global change on tropical forests. *Philosophical Transactions of The Royal Society B* 359, 437-462.
- Linares, O. 2004. Bioestratigrafía de las faunas de mamíferos de las formaciones Socorro, Urumaco y Codore (Mioceno Medio-Plioceno Temprano, de la región de Urumaco, Falcon, Venezuela. *Paleobiología Neotropical* 1, 1-26.
- Littler, K., Robinson, s. A., Bown, P. R., nederbragt, A. J., and Pancost, R. D. 2011. High sea-surface temperatures during the Early Cretaceous Epoch. *Nature Geoscience* 4, 169-172.
- Liu, Z., Pagani, M., Zinniker, D., DeConto, R., Huber, B. t., Brinkhuis, H., shah, s. R., Leckie, R. M., and Pearson, A. 2009. Global Cooling During the Eocene-Oligocene Climate Transition. *Science* 323, 1187-1190.
- Lloyd, J., and Farquhar, G. D. 1994. 13C discrimination during CO<sub>2</sub> assimilation by the terrestrial biosphere. *Oecologia* 99, 201-215.
- Lloyd, J., and Farquhar, G. D. 2008. Effects of rising temperatures and [CO<sub>2</sub>] on the physiology of tropical forest trees. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 1811-1817.
- Lupia, R., Lidgard, s., and Crane, P. R. 1999. Comparing Palynological Abundance and Diversity: Implications for Biotic Replacement during the Cretaceous Angiosperm Radiation. *Paleobiology* 25, 305-340.
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, t., Barnola, J.-M., siegenthaler, u., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., and stocker, t. F. 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature* 453, 379-382.
- MacFadden, B. J. 2006. Extinct mammalian biodiversity of the ancient New World tropics. *Trends in Ecology & Evolution* 21, 157-165.
- Magallón, s., and Castillo, A. 2009. Angiosperm Diversification through Time. *American Journal of Botany* 96, 349-365.
- Martinez, J. I. 2009. La historia Cenozoica del fenómeno del el Niño. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 33, 491-511.
- McInerney, F. A., and Wing, s. L. 2011. The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: A Perturbation of Carbon Cycle, Climate, and Biosphere with Implications for the Future. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 39, 489-516.
- Mejia, P. 2007. Floral composition of a lower Cretaceous paleotropical ecosystem inferred from quantitative palynology [Ms: University of Florida, 35.
- Mejia, P., Dilcher, D., and Jaramillo, C. Early angiosperm evolution in tropical latitudes inferred from Cretaceous palynofloras. in *Proceedings Advances in Paleobotany*, Gainesville, Florida, 2006, University of Florida, 46.
- Mikolajewicz, u., Maier-Raimer, e., Crowley, t. J., and Kim, K. Y. 1993. Effect of Drake and Panamanian gateways on the circulation of an ocean model. *Paleoceanography* 8, 409-426.
- Monnin, e., Indermühle, A., Dällenbach, A., Flückiger, J., staufer, B., stocker, t. F., Raynaud, D., and Barnola, J.-M. 2001. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations over the last glacial termination. *Science* 291, 112-114.
- Moore, M. J., soltis, P. s., Bell, C. D., Burleigh, J. G., and soltis, D. e. 2010. Phylogenetic analysis of 83 plastid genes further resolves the early diversification of eudicots. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 4623-4628.
- Mora, A., Parra, M., strecker, M. R., sobel, e. R., Zeilinger, G., Jaramillo, C., Da silva, s., and Blanco, M. 2010. The Foothills

- of the Eastern Cordillera of Colombia. An example of multiple factors controlling structural styles and active tectonics. *Geological Society of America Bulletin* 122, 1846-1864.
- Morgan, M. e., Kingston, J. D., and Marino, B. D.** 1994. Carbon isotopic evidence for the emergence of C4 plants in the Neogene from Pakistan and Kenya. *Nature* 367, 162-165.
- Moritz, C., Patton, J. L., schneider, C. J., and smith, t. B.** 2000. Diversification of rainforest faunas: An Integrated Molecular Approach. *Annual Review of Ecology and Systematics* 31, 533-563.
- Muller-Landau, H. C.** 2010. The tolerance–fecundity trade-off and the maintenance of diversity in seed size. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 4242–4247.
- nichols, D. J., and Johnson, K. G.** 2008. *Plants and the K–T Boundary*. Cambridge University Press, 292.
- niu, s., Wu, M., Han, Y., Xia, J., Li, L., and Wan, s.** 2008. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist* 177, 209–219.
- Parra, M., Mora, A., Jaramillo, C., torres, V., Zeilinger, G., and strecker, M.** 2010. Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia. *Basin Research* 22, 874-903.
- Peppen, D., Royer, D., Cariglino, C., Oliver, s., newman, D., Leight, e., enikolopov, G., Fernandez-Burgos, M., Herrera, F., Adams, J., Correa, e., Currano, e., Hinojosa, F., Hoganson, J., Iglesias, A., Jaramillo, C., Johnson, K., Kraft, K., Levelock, e., Lusk, C., niinemets, u., Peñuelas, J., Rapson, G., Wing, s., and Wright, I.** 2011 Sensitivity of leaf size and shape to climate: global patterns and paleoclimatic applications. *New Phytologist* 190, 724-739.
- Pons, D.** 1988. *Le Mesozoïque de Colombie : macroflores et microflores*. Editions du Centre national de la recherche scientifique : Diffusion Presses du CNRS, 168.
- Poveda, G., Waylen, P. R., and Pulwarty, R. s.** 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234, 3-27.
- Quiroz, L., and Jaramillo, C.** 2009. Stratigraphy and sedimentary environments of Miocene shallow to marginal marine deposits in the Urumaco Trough, Falcon Basin, western Venezuela. in Sanchez-Villagra, M., Aguilera, O., and Carlini, A. A., eds., *Urumaco and Venezuelan Palaeontology. The fossil record of the Northern Neotropics*. Indiana University Press, 153-172.
- Ramirez, s. R., Gravendeel, B., singer, R. B., Marshall, C. R., and Pierce, n. e.** 2007. Dating the origin of the Orchidaceae from a fossil orchid with its pollinator. *Nature* 448, 1042-1045.
- Rangel, A., Moldowan, J. M., nino, C., Parra, P., and Giraldo, B. n.** 2002. Umir Formation: Organic geochemical and stratigraphic assessment as cosource for Middle Magdalena basin oil, Colombia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 86, 2069-2087.
- Räsänen, M., Linna, A. M., santos, J. C. R., and negri, F. R.** 1995. Late Miocene tidal deposits in the Amazonian foreland basin. *Science* 269, 386–389.
- Rasanen, M., salo, J. s., Jungnert, H., and Romero-Pitman, L.** 1990. Evolution of the western Amazon lowland relief: impact of Andean foreland dynamics. *Terra Nova* 2, 320-332.
- Räsänen, M. e., salo, J. s., and Kalliola, R. J.** 1987. Fluvial Perturbation in the Western Amazon Basin: Regulation by Long-Term Sub-Andean Tectonics. *Science* 238, 1398-1401.
- Ravelo, A. C., Dekens, P. s., and McCa rthy, M.** 2006. Evidence for el niño– like conditions during the Pliocene. *GSA Today* 16, 4-11.
- Rebata-H., L. A., Gingras, M., Rasanen, M., and Barberi, M.** 2006a. Tidal-channel deposits on a delta plain from the Upper Miocene Nauta Formation, Marañon Foreland Sub-basin, Peru. *Sedimentology* 53, 971-1013.
- Rebata-H., L. A., Räsänen, M. e., Gingras, M. Y. K., Vieira Jr., V., Barberi, M., and Irion, G.** 2006b. Sedimentology and ichnology of tide-influenced Late Miocene successions in western Amazonia: The gradational transition between the Pebas and Nauta formations. *Journal of South American Earth Sciences* 21, 96-119.
- Rincón-Martínez, D., Lamy, F., Contreras, s., Leduc, G., Bard, e., saukel, C., Blanz, t., Mackensen, A., and tiedemann, R.** 2010. More humid interglacials in Ecuador during the past 500 kyr linked to latitudinal shifts of the equatorial front and the Intertropical Convergence Zone in the eastern tropical Pacific. *Paleoceanography* 25, PA2210.
- Rivadeneira, M., and Baby, P.** 1999. *La Cuenca Oriente: Estilo Tectónico, Etapas de Deformación y Características Geológicas de los Principales Campos de Petroproducción: Petroproducción*.
- Roddaz, M., Baby, P., Brusset, s., Hermoza, W., and Darrozes, J. M.** 2005. Forebulge dynamics and environmental control in Western Amazonia: The case study of the Arch of Iquitos (Peru). *Tectonophysics* 399, 87-108.
- Roddaz, M., Brusset, s., Baby, P., and Herail, G.** 2006. Miocene tidal-influenced sedimentation to continental Pliocene sedimentation in the forebulge–backbulge depozones of the Beni–Mamore foreland Basin (northern Bolivia). *Journal of South American Earth Science* 20, 351-368.
- Roddaz, M., Hermoza, W., Mora, A., Baby, P., Parra, M., Christophoul, F., Brusset, s., and esput, n.** 2010. Cenozoic sedimentary evolution of the Amazonian foreland basin system. in Hoorn, M. C., and Wesselingh, F. P., eds., *Amazonia, Landscape and Species Evolution*. Blackwell, 61-88.
- Rosenzweig, M. L.** 1995. *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press, 433.
- Royer, D. L.** 2006. CO2-forced climate thresholds during the Phanerozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 5665–5675.
- . 2010. Fossil soils constrain ancient climate sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 517-518.
- Royer, D. L., Pagani, M., and Beerling, D. J.** 2011. Geologic constraints on earth system sensitivity to CO2 during the Cretaceous and early Paleogene. *Earth System Dynamic Discussions* 2, 1-30.
- sage, R. F., Wedin, D. A., and Li, M.** 1999. The biogeography of C4 photosynthesis: patterns and controlling factors. in Sage, R. F., and R.K., M., eds., *C4 Plant Biology*. Academic Press, 313–373.
- sanchez-Villagra, M., and Aguilera, O.** 2006. Neogene vertebrates from Urumaco, Falcon State, Venezuela: diversity and significance. *Journal of Systematic Palaeontology* 4, 213-220.
- sanchez-Villagra, M., Aguilera, O., and Horovitz, I.** 2003. The anatomy of the world's largest extinct rodent. *Science* 301, 1678–1679.
- sánchez-Villagra, M. R.** 2006. Vertebrate fossils from the Neogene of Falcon State, Venezuela: contributions on Neotropical Palaeontology. *Journal of Systematic Palaeontology* 4, 211.

- sarmiento, G.** 1992. Palinología de la Formación Guaduas - estratigrafía y sistemática. *Boletín Geológico Ingeominas* 32, 45-126.
- schuettpeiz, e., and Pryer, K. M.** 2009. Evidence for a Cenozoic radiation of ferns in an angiosperm-dominated canopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 11200-11205.
- schultz, t., and Brady, s.** 2008. Major evolutionary transitions in ant agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 5435.
- sepulchre, P., sloan, L. C., and Fluteau, F.** 2010. Modelling the response of Amazonian climate to the uplift of the Andean mountain range. In Hoorn, M. C., and Wesselingh, F. P., eds., *Amazonia, Landscape and Species Evolution*. Blackwell, 211-222.
- sepulchre, P., sloan, L. C., snyder, M., and Fiechter, J.** 2009. Impacts of Andean uplift on the Humboldt Current system: A climate model sensitivity study. *Paleoceanography* 24, PA4215.
- shackleton, n. J., Backman, J., Zimmerman, H., Kent, D. V., HALL, M. A., Roberts, D. G., schnitker, D., Baldauf, J. G., Desprairies, A., Homrighausen, R., Huddleston, P., Keene, J. B., Kaltenback, A. J., Krumsiek, K. A. O., Morton, A. C., Murray, J. W., and Westberg-smith, J.** 1984. Oxygen isotope calibration of the onset of ice rafting and history of glaciation in the North Atlantic region. *Nature* 307, 620-623.
- shellito, C. J., sloan, L. C., and Huber, M.** 2003. Climate model sensitivity to atmospheric CO<sub>2</sub> levels in the Early-Middle Paleogene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 193 113-123.
- siegenthaler, u., stocker, t. F., Monnin, e., Lüthi, D., schwander, J., stauffer, B., Raynaud, D., Barnola, J.-M., Fischer, H., Masson-Delmotte, V., and Jouzel, J.** 2005. Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the Late Pleistocene. *Science* 310, 1313-1317.
- silva, s., Jaramillo, C., and Absy, M. L.** 2010. Neogene Palynology of the Solimoes Basin, Brazilian Amazonia. *Palaeontographica Abteilung B* 283, 1-67.
- simpson, G. G.** 1983. *Splendid Isolation: The Curious History of South American Mammals*. Yale University Press, 275.
- sloan, L. C., and Barron, e. J.** 1992. A comparison of Eocene climate model results to quantified paleoclimatic interpretations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 93, 183-202.
- sloan, L. C., and Morrill, C.** 1998. Orbital forcing and Eocene continental temperatures. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 144, 21-35.
- sloan, L. C., and Rea, D. K.** 1995. Atmospheric carbon dioxide and early Eocene climate: A general circulation modeling sensitive study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 119, 275-292.
- sloan, L. C., and t homas, e.** 1998. Global climate of the Late Paleocene Epoch: Modeling the Circumstances Associated with a Climatic "Event". In Berggren, W., Aubry, M. P., and Lucas, S., eds., *Late Paleocene-Early Eocene Biotic and Climatic Events*. Columbia University Press, 138-157.
- sloan, L. C., Walker, J. C., and Moore, t. C.** 1995. Possible role of oceanic heat transport in early Eocene climate. *Paleoceanography* 10, 347-356.
- sole de Porta, n.** 1971. Algunos géneros nuevos de polen procedentes de la Formación Guaduas (Maastrichtiense) Paleoceno de Colombia. *Studia Geologica* 2, 133-143.
- stainforth, R. M.** 1955. Ages of Tertiary Formations in Northwest Peru. *AAPG Bulletin* 39, 2068-2077.
- stoskopf, n.** 1981. *Understanding crop production: Upper Saddle River*. Reston publishing company, Inc., 433.
- sucerquia, P., and Jaramillo, C.** 2008. Lower Cretaceous Floras From Central Colombia. *Palynology* 32, 271-272.
- sun, G., and Dilcher, D.** 2002. Early angiosperms from the Lower Cretaceous of Jixi, eastern Heilongjiang, China. *Review of Palaeobotany and Palynology* 12, 91-112.
- sun, G., Dilcher, D., Wang, H., and Chen, Z.** 2011. A eudicot from the Early Cretaceous of China. *Nature* 471, 625-628.
- sun, G., Q. Ji, Q., Dilcher, D. L., Zheng, s., nixon, K. C., and Wang, X.** 2002. Archaeofractaceae, a New Basal Angiosperm Family. *Science* 296, 899-904.
- t ewksbury, J. J., Huey, R. B., and Deutsch, C. A.** 2008. Putting the Heat on Tropical Animals. *Science* 320.
- t homas, e., and shackleton, n. J.** 1996. The Paleocene-Eocene benthic foraminiferal extinction and stable isotope anomalies. In Knox, R., Corfield, R. M., and Dunay, R. E., eds., *Correlations of the early Paleogene in Northwest Europe*. Geological Society of London Special Publication, 401-411.
- t homas, W. W.** 1999. Conservation and monographic research on the flora of Tropical America. *Biodiversity and Conservation* 8, 1007-1015.
- t oivonen, t., Maki, s., and Kalliola, R.** 2007. The riverscape of Western Amazonia – a quantitative approach to the fluvial biogeography of the region. *Journal of Biogeography* 34, 1374-1387.
- t ripati, A., Roberts, C., and eagle, R.** 2009. Coupling of CO<sub>2</sub> and ice sheet stability over major climate transitions of the last 20 million years. *Science* 326, 1394.
- t schopp, H. J.** 1953. Oil Explorations in the Oriente of Ecuador. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 37, 2303-2347.
- uba, C. e., Hasler, C. A., Buatois, L. A., schmitt, A. K., and Plesken, B.** 2009. Isotopic, paleontologic and ichnologic evidence for late Miocene pulses of marine incursions in the central Andes. *Geology* 37, 827-830.
- uba, C. e., Heubeck, C., and Hulka, C.** 2005. Facies analysis and basin architecture of the Neogene Subandean synorogenic wedge, southern Bolivia. *Sedimentary Geology* 180, 91-123.
- ufnar, D.** 2002. The mid-Cretaceous water bearer: isotope mass balance quantification of the Albian hydrologic cycle. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 188, 51-71.
- ufnar, D., Gonzalez, L., Ludvigson, G., Brenner, R., and Witzke, B.** 2004. Evidence for increased latent heat transport during the Cretaceous (Albian) greenhouse warming. *Geology* 32, 1049-1052.
- ufnar, D. F., Ludvigson, G. A., González, L., and Gröcke, D. R.** 2008. Precipitation rates and atmospheric heat transport during the Cenomanian greenhouse warming in North America: Estimates from a stable isotope mass-balance model. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 266, 28-38.
- uno, K. t., Cerling, t. e., Harris, J. M., Kunimatsu, Y., Leakey, M. G., nakatsukaka, M., and nakaya, H.** 2011. Late Miocene to Pliocene carbon isotope record of differential diet change among East African herbivores. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 10.1073/pnas.1018435108.
- Van der Hammen, t.** 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectonogénesis de los Andes Colombianos. *Boletín Geológico (Bogotá)* 6, 67-128.

- . 1989. History of the montane forests of the northern Andes. *Plant Systematics and Evolution* 162, 109-114.
- Van der Hammen, t.** 1995. Plioceno y Cuaternario del Altiplano de Bogota y Alrededores. *Análisis Geográficos* 24, 1-142.
- . 2003. Plioceno y Cuaternario del Altiplano de Bogota y Alrededores. *Análisis Geográficos* 26, 101-120.
- Van der Hammen, t., and Hooghiemstra, H.** 1997. Chronostratigraphy and correlation of the Pliocene and Quaternary of Colombia. *Quaternary International* 40, 81-91.
- . 2000. Neogene and Quaternary history of vegetation, climate, and plant diversity in Amazonia. *Quaternary Science Reviews* 19, 725-742.
- Van der Hammen, t., Werner, J., and Dommelen, H.** 1973. Palynologic record of the upheaval of the Northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the Early evolution of its high-Andean biota. *Review of Palaeobotany and Palynology* 16, 1-122.
- Vermeij, G., and Wesselingh, F.** 2002. Neogastropod Molluscs from the Miocene of Western Amazonia, with Comments on Marine to Freshwater Transitions in Molluscs. *Journal of Paleontology* 76, 265-270.
- Vonhof, H. B., Wesselingh, F. P., Kaandorp, R. J. G., Davies, G. R., van Hinte, J. e., Guerrero, J., Rasanen, M., Romero-Pittman, L., and Ranzi, A.** 2003. Paleogeography of Miocene Western Amazonia: Isotopic composition of molluscan shells constrains the influence of marine incursions. *Geological Society of America Bulletin* 115, 983-993.
- Wang, H., Moore, M. J., Soltis, P. s., Bell, C. D., Brockington, s. F., Alexandre, R., Davis, C. C., Latvis, M., Manchester, s., and Soltis, D. e.** 2009. Rosid radiation and the rapid rise of angiosperm-dominated forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 3853-3858.
- Waveren, I. M., Konijnenburg, J. H. A., Burgh, J., and Dilcher, D.** 2002. Macrofloral remains from the Lower Cretaceous of the Leiva region (Colombia). *Scripta Geologica* 123, 1-39.
- Webb, s. D.** 1976. Mammalian Faunal Dynamics of the Great American Interchange. *Paleobiology* 2, 220-234.
- . 1978. A history of savanna vertebrates in the New World. Part II: South America and the great interchange. *Annual Review of Ecology and Systematics* 9, 393-426.
- . 1994. Successful in Spite of Themselves. *Natural History* 4, 50-53.
- Webb, s. D.** 1996. Biological Implications of the Middle Miocene Amazon Seaway. *Science* 269, 361-362.
- Webb, s. D.** 2006. The great American biotic interchange: patterns and processes. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 93, 245-257.
- Wesselingh, F., and Salo, J. A.** 2006. A Miocene perspective on the evolution of the Amazonian biota. *Scripta Geologica* 133, 439-458.
- Wesselingh, F. P.** 2006a. Miocene long-lived lake Pebas as a stage of mollusk radiations, with implications for landscape evolution in western Amazonia. *Scripta Geologica* 133, 1-17.
- . 2006b. Molluscs from the Miocene Pebas Formation of Peruvian and Colombian Amazonia. *Scripta Geologica* 133, 19-290.
- Westaway, R.** 2006. Late Cenozoic fluvial sequences in western Amazonia: fluvial or tidal? deductions from the June 2003 IGCP 449 field trip. *Journal of South American Earth Sciences* 21, 120-134.
- Westerhold, t., Röhl, u., McCarren, H. K., and Zachos, J. C.** 2009. Latest on the absolute age of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM): New insights from exact stratigraphic position of key ash layers +19 and -17. *Earth and Planetary Science Letters* 287, 412-419.
- Wijmstra, t. A., and Van der Hammen, t.** 1966. Palynological data on the history of tropical savannas in northern South America. *Leidse Geologische Mededelingen* 38, 71-90.
- Wijninga, V. M.** 1996. Paleobotany and Palynology of Neogene sediments from the High Plain of Bogota (Colombia), Evolution of the Andean flora from a paleoecological perspective. Ponsen and Looijen BV, Wageningen, 370.
- Wijkström, n., Savolainen, V., and Chase, M. W.** 2001. Evolution of the angiosperms: calibrating the family tree. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 268, 2211-2220.
- Williams, J. H.** 2008. Novelities of the flowering plant pollen tube underlie diversification of a key life history stage. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 11259-11263.
- Wing, s., and Boucher, L.** 1998. Ecological aspects of the Cretaceous flowering plant radiation. *Ann Rev Earth Pl Sc* 26, 379-421.
- Wing, s. L., Harrington, G. J., Smith, F., Bloch, J. I., and Boyer, D. M.** 2005. Transient floral change and rapid global warming at the Paleocene-Eocene boundary. *Science* 310, 993-996.
- Wing, s. L., Herrera, F., Jaramillo, C., Gomez, C., Wilf, P., and Labandeira, C. C.** 2009. Late Paleocene fossils from the Cerrejón Formation, Colombia, are the earliest record of Neotropical Rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 18627-18632.
- Wing, s. L., Hickey, L. J., and Swisher-III, C. C.** 1993. Implications of an exceptional fossil flora for Late Cretaceous Vegetation. *Nature* 363, 342-344.
- Woodburne, M. O.** 2010. The Great American Biotic Interchange: Dispersals, Tectonics, Climate, Sea Level and Holding Pens. *Journal of Mammalian Evolution* 17, 245-264.
- Wright, s., Keeling, J., and Gillman, L.** 2006. The road from Santa Rosalia: A faster tempo of evolution in tropical climates. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, 7718-7722.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, e., and Billups, K.** 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292, 686-693.
- Zachos, J. C., Wara, M. W., Bohaty, s., Delaney, M. L., Petrizzo, M. R., Brill, A., Bralower, t. J., and Premoli-silva, I.** 2003. A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Science* 302, 1551-1554.

Recibido: Agosto 23 de 2011.

Aceptado para su publicación: Febrero 24 de 2012.

## COMENTARIOS ACERCA DE LA RECEPCIÓN DE LA TEORÍA DE CHARLES DARWIN EN COLOMBIA

santiago Díaz Piedrahita\*

### Resumen

**Díaz Piedrahita s.:** Comentarios acerca de la recepción de la teoría de Charles Darwin en Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **36** (138): 79-92, 2012. ISSN 0370-3908.

Se comenta la forma como fue recibida por la comunidad intelectual colombiana la obra de Darwin y en particular la teoría del origen de las especies a través de la Selección Natural. En general fue calificada de utilitarista y recibida con poca credibilidad, juzgándola desde un punto de vista puramente religioso o político y no como una teoría biológica. Se presentan algunos testimonios propios de la época que reflejan el momento político y la ideología imperantes.

**Palabras clave:** Darwin, Selección Natural, Evolución, Colombia.

### ABSTRACT

The article exposes the way in which the intellectual community of Colombia received Darwin's works, specifically the Theory of Evolution through Natural Selection. Overall, his arguments were considered utilitarian and interpreted from a purely religious or political perspective, rather than being understood as a biological theory. In addition, the text presents testimonies that reflect the political times and the prevailing ideologies of the late 19th and early 20th centuries.

**Key words:** Darwin, Natural Selection, Evolution, Colombia.

El doce de febrero de 2010 se cumplieron dos siglos del natalicio de Charles Darwin. Con tal motivo el autor de estas líneas dio a conocer un escrito<sup>1</sup> en el que recordaba los antecedentes del viaje realizado por el naturalista inglés y las consecuencias científicas de ese recorrido merced a los cambios operados en su mane-

ra de pensar y en su concepción de la naturaleza. En esa publicación se alcanzaron a plantear algunos aspectos relativos a la forma como fue recibida por algunos intelectuales colombianos la teoría de la selección natural, concepto que modificó el curso de la ciencia y abrió una nueva visión del hombre en relación con su entorno. En este artículo se complementa esta información con testimonios o manifestaciones literarias que reflejan diferentes puntos de vista en cuanto a la evolución.

<sup>1</sup> Díaz Piedrahita, S. *En el Bicentenario del Natalicio de Charles Darwin*. Boletín de la Academia Colombiana **49**(243 – 244): 87 – 97. 2009.

Sin lugar a dudas, *El Origen de las Especies a través de la Selección Natural*<sup>2</sup> fue la obra más influyente del Siglo XIX. Aunque la doctrina evolutiva no fue concebida por Darwin, su planteamiento sobre el origen de las especies fue tan claro y convincente que ganó el apoyo de la comunidad científica y de muchos profanos que lo leyeron prontamente. Cabe aclarar que, en el caso colombiano, quienes tomaron partido en la polémica evolucionista no tenían verdadero interés en la historia natural y tan sólo lo hicieron por motivos meramente políticos o religiosos.

Darwin buscaba explicar la diversidad de los seres vivos, tanto la de aquellos que ahora pueblan el planeta como de los que lo habitaron en el pasado y dejaron un testimonio fósil de su existencia. Debía entender el papel jugado por el medio ambiente a través de barreras geográficas o reproductivas, impedimentos que servían para valorar el carácter adaptativo y relativo de las variaciones genéticas emanadas de la recombinación de los caracteres genéticos, las mutaciones y la supervivencia de los más aptos en su lucha por sobrevivir y alcanzar la madurez sexual. En forma acertada, interpretó estos factores como un mecanismo de selección natural en el que el azar jugaba un papel decisivo.

Luego de meditar detenidamente sus hipótesis y de dar coherencia a su teoría, y ante el riesgo de perder la prioridad en el planteamiento de estos conceptos, Darwin dio a la luz una hipótesis cuyas conclusiones explicaban adecuadamente un concepto que, entonces como ahora, generaba fuertes resistencias. Por motivos religiosos, culturales o políticos, para muchos era inaceptable que las especies evolucionaran. Mientras Darwin cavilaba, en forma independiente, otro naturalista inglés, Alfred Russell Wallace, llegaba a conclusiones similares luego de estudiar la fauna y la flora del archipiélago Malayo. Aunque Wallace sostenía sus ideas con energía y claridad, desde un principio las obras de Darwin fueron más conocidas y tuvieron mayor difusión. La primera edición de *El Origen de las especies* fue de dos mil doscientos ejemplares que se agotaron en pocas horas; desde entonces se han impreso millares de volúmenes en diversos idiomas y la teoría de la evolución, aunque de aceptación universal en el ámbito biológico, sigue despertando polémicas y prestándose a variadas interpretaciones.

2 El título original de la obra en la cual se expuso la teoría es: *On the Origin of Species by Means Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*.

Antes de 1832, cuando se realizó el viaje del Beagle, para Darwin el relato bíblico satisfacía su comprensión del mundo viviente. Luego de concluir el recorrido, su forma de entender ese mundo había cambiado en forma radical. Aparte de sus observaciones en el campo, la lectura de obras como el *Ensayo sobre la población* de Thomas Malthus, influyeron en sus conclusiones. Allí se demostraba que una población crece en progresión geométrica hasta aparecer un factor limitante.

Veamos cómo fue recibida la teoría por los intelectuales colombianos de esa agitada segunda mitad del siglo XIX y como aun en la primera mitad del siglo XX causaban escozor en algunos sectores de la sociedad. No abundan las referencias sobre el tema. Las más categóricas se deben a Miguel Antonio Caro. Este notable pensador y político, bajo el título *El Darwinismo y las Misiones*<sup>3</sup>, dedicó numerosos comentarios críticos a un escrito de Jorge Isaacs, secretario de la Comisión Científica al Magdalena, empresa oficial dirigida por el naturalista francés Carlos Manó, calificado por Caro, como un "aventurero embaucador." Isaacs realizó, durante más de seis meses, originales observaciones de campo que fueron consignadas en el trabajo: *Estudio sobre las tribus indígenas del Magdalena*, obra publicada en el Diario Oficial en 1882, complementada en 1884 en los *Anales de Instrucción Pública* con la publicación de: *Gramática, Catecismos y Vocabularios de la lengua Goajira*, trabajos reproducidos en 1951 en la *Biblioteca Popular de Cultura Colombiana*. El artículo completo del Sr. Caro también fue dado a conocer en *El Repertorio Colombiano*, en dos entregas<sup>4</sup>. En la introducción se señala: "Sin erigirnos en críticos científicos, vamos a hacer sobre esta publicación breves observaciones inspiradas en la justicia, el sanctae sancte tractandae, porque la obra del Sr. Isaacs es un trabajo curioso, pero de ningún modo científico." Cabe recordar que *El Repertorio* era una revista mensual de orientación conservadora a cargo de don Carlos Martínez Silva, donde, como veremos, el tema de la evolución se trató en varias oportunidades.

Caro además de catalogar el escrito de Isaacs como una obra curiosa, de ningún modo científica, califica

3 CARO, M.A. *Obras*, Tomo 1, *Filosofía, Religión, Pedagogía*. Instituto Caro y Cuervo, Clásicos Colombianos IV: 1048 - 1107. Bogotá, 1962. Reproducido en 1951 junto con el informe de Isaacs en la *Biblioteca Popular de Cultura Colombiana*. pp. 291 - 354.

4 *Repertorio Colombiano*, 5: 464 - 491, enero de 1887 y 7: 5 - 35.

al autor como un simple y pedante compilador de rasgos poéticos, plasmados en largas transcripciones de comentarios, citas y observaciones personales. Esas transcripciones de tipo mitológico habían sido recogidas pacientemente por el autor de *María*, y provenían del testimonio directo de los sacerdotes o mamos que describían su interpretación del origen del mundo y de la aparición de los hombres. El ataque más fuerte alude a la interpretación de las pictografías y jeroglíficos comentados por Isaacs, quien había consignado la siguiente explicación:

*Tolerándolo mis lectores muy susceptibles, los partidarios de la teoría darwinista podríamos suponer que la figura número 12, mitad simia y de rostro muy raro, es representación de la forma que tuvo el animal, temible como se ve, que precedió al hombre en la escala de perfeccionamiento.*<sup>5</sup>

La enérgica reacción de Caro a esta observación evolucionista señala:

*Es deplorable ver a un verdadero poeta convertido por arte de magia, como los compañeros de Ulises, en discípulo de Darwin, y discípulo de aquellos que imitan lo más feo del maestro por espíritu de remedo; por aquellos que precisaron la teoría transformista, estableciendo una obligada genealogía, que nos hace descender no de una "forma primitiva" sino del "simio", como lo llama el señor Isaacs, o sea del "mono."*

*Ya hemos observado que poeta y materialista, o darwinista, son términos contradictorios.*

*No se puede negar que los remedadores de Darwin, por su inclinación a la imitación grotesca, tienen ciertas afinidades, con su presunto abolengo; afinidades, decimos, y nada más como las podemos cualesquiera hombres tener con las imágenes de virtudes y vicios repartidas en la naturaleza animal; pues, por lo demás, no admitimos para ningún racional, incluso los darwinianos, la miserable alcurnia que ellos con tan escaso sentimiento nobiliario se atribuyen.*<sup>6</sup>

5 Isaacs, J. *Estudio sobre las tribus indígenas del Magdalena*, Biblioteca Popular de Cultura Colombiana, Bogotá, 1951 pp.244 – 245.

6 *Ibid.* p. 307.

El pensador bogotano rechaza tajantemente la hipótesis darwinista, que en sus palabras:

*"... nos niega nuestro excelso origen y destinos inmortales y nos reduce a la triste condición de descendientes de uno de los brutos más repugnantes?"*

*Si al menos se nos clasificara como progenitores de monos! ¿Pero descendientes?... El ascendiente puede estar exento de los vicios adquiridos por una progenie degenerada; pero a esta ¿que esperanza le queda?"*<sup>7</sup>

Páginas adelante el señor Caro define la teoría de Darwin como una aberración propia de un especialista maniático, que ha perdido la visión de conjunto, y cierra su crítica con la siguiente aseveración:

*Darwin descontento con las clasificaciones admitidas por otros naturalistas, se esforzó por simplificarlas, suponiendo, sobre una hipótesis vieja, que todos los animales y plantas se derivan de un reducido número de formas primitivas, acaso de una forma única, y todas sus modificaciones sucesivas dependen de una ley constante de elección regular (natural selection) de individuos y de razas, mejor adaptadas a los tiempos y circunstancias. Y como el hombre es un animal, el naturalista, sin contar con Dios, ni con la historia, ni con el hombre mismo, toma ese animal, como pudiera tomar un molusco o un cetáceo, y con la mayor naturalidad, tal vez con candor, lo coloca donde mejor conviene a su teoría preconstituida.*<sup>8</sup>

En la nota de pie de página correspondiente al anterior párrafo señala:

*"La teoría transformista de Darwin no es nueva. Precedióle el francés Lamarck (1744-1829), y el origen atómico y la generación espontánea, base de esta teoría se remontan a Lucrecio y a Epicuro."*

y en otro comentario dice:

*"Si Darwin hubiera sido filósofo habría colocado (como muchos filósofos) en la mente creadora*

7 *Ibíd.*

8 *Ibíd.* pp. 309 - 310

*aquella unidad y simplicidad de ideas que no alcanzó a ver sino en imaginarios tipos reales de la naturaleza. Negando la unidad de la familia humana fue a buscar una unidad más general en tipos más groseros, originarios del átomo. Los que no quieren mirar a Dios van a parar al Dios-Nada.*"<sup>9</sup>

Como corolario a estos comentarios de Caro se puede señalar que el humanista no comprendió plenamente, o no quiso comprender, la teoría de Darwin, hoy de plena aceptación en el ámbito biológico, y que sus juicios críticos carecían de objetividad y estaban cargados de animadversión y rencor político. No en vano califica al autor de *María* como un comerciante voluble, que de periodista y político conservador mutó al radicalismo para llegar a ser cónsul en Chile, y que de empresario agrícola fracasado pasó a militar y a revolucionario, para convertirse finalmente en explorador y contratista de las carboneras de la Guajira. No olvidaba que Isaacs había participado en la contienda civil de 1875, había combatido en "Los Chancos" y había atacado a algunos clérigos inmiscuidos en política. En el fondo le aterraba esa visión moderna del origen del hombre que hacía vibrar las bases de la ortodoxia religiosa con nuevos conceptos antropológicos y sociales.

Para Caro, en relación con la teoría que comentamos, Isaacs suponía lo que los propios darwinistas no se atrevían a suponer, porque no podían suponerlo. Nunca le quitó el timbre de "darwinista". A raíz de un eventual nombramiento del autor de *María* como cónsul de México en Colombia Caro, con clara intención de entorpecer cualquier nominación, escribió a Victoriano Agüeros:

*"Isaacs es hijo de judío converso y él tiene mucho de tornadizo. Ha sido realmente un hombre desgraciado, por su culpa y su mal carácter. En 1868 era conservador; sus partidarios le enviaron al Congreso. Entonces escribió MARIA que yo ayudé a corregir en pruebas, y sus primeras poesías. De la noche a la mañana se hizo liberal y masón, y desde entonces se esterilizó por completo su entendimiento. Sin motivo alguno se declaró enemigo de la iglesia y hace gala de darwinista....."*<sup>10</sup>

Estos tres calificativos: liberal, masón y darwinista resultaban suficientes en aquel momento para frenar cualquier aspiración burocrática, en particular si ésta emanaba de un gobierno de clara orientación derechista, donde resultaba inconcebible reconocer un proceso evolutivo producido por selección natural y perpetuado mediante la herencia. Estos novedosos conceptos obviamente alteraban la estabilidad, la armonía y el orden de la creación y de paso socavaban la moral y el principio de autoridad oficial y de la Iglesia local que se inmiscuía indebidamente en el manejo del gobierno.

Caro en uno de sus escritos<sup>11</sup> cita una estrofa de Núñez de Arce<sup>12</sup>, que se podría aplicar a sus opiniones sobre Darwin, a quien no llegó a entender. Dicen así los versos:

*"Te han calumniado  
¡oh Dios! Tú oyes el grito  
Del corazón doliente y consternado;  
Tienes misericordia y no has proscrito  
La augusta libertad. Te han calumniado!"*

Otros puntos de vista del señor Caro muestran claramente su pensamiento y su ideología. En un artículo titulado *El derecho de definir* señala claramente el ámbito de los temas dogmático y científico, pero, como ya lo hemos visto en sus escritos, no respetó tales límites y faltó a esa objetividad que pregona en el texto que sigue.

*"Hay otro orden de verdades que no pertenecen a la esfera moral, que no son necesarias para el logro de nuestro final destino, y tampoco, por tanto, de observancia obligatoria, pero sí útiles para el cultivo de la inteligencia y para los usos prácticos de la vida. A diferencia de las verdades dogmáticas, estas otras pertenecen al orden científico. Esta clase de conocimientos, dada la limitación del entendimiento humano que los adquiere, son incompletos y progresivos, es decir, sujetos, como lo demuestra la experiencia, a constantes rectificaciones. La Iglesia, maestra infalible en el orden religioso y moral, nada tiene que hacer como autoridad, por su divina institución, en la región científica, lo que no obsta*

9 Ibíd.

10 Documento citado por Luís Carlos Velasco en: *El Explorador Jorge Isaacs*. Imprenta Departamental, pp. 59-60. Cali. 1967.

11 Caro, M.A. *Artículos y discursos*. Primera parte. Bogotá, Librería Americana. 1888.

12 Adelante se transcribe parte del poema dedicado a Darwin por Núñez de Arce y que generó irritación al señor Caro.

*a la generosa protección que siempre ha dispensado a los estudios. La ciencia profana tiene sus oráculos propios, más o menos autorizados, nunca infalibles.*<sup>13</sup>

Finalmente en un texto titulado *La religión y la poesía* fija su posición en relación con la ciencia, el positivismo y el materialismo con base en un texto de Louis Pasteur:

*“M. Pasteur, en su reciente discurso de recepción en la Academia francesa, ha hecho una confrontación luminosa del criterio experimental que indaga verdades ocultas, y el método materialista, positivista, que consigna simplemente hechos. Son dos métodos enteramente opuestos en el punto de vista filosófico. El investigador científico reconoce implícitamente que lo visible es sólo un velo que cubre lo invisible, que la ciencia no está íntegra, ni con mucho, en el entendimiento humano, sino en la inteligencia infinita; los secretos que se esfuerza en arrancar a la naturaleza, son revelaciones de la suprema sabiduría, y él vive y se alimenta de la esperanza de saber más. El positivista, por el contrario, se encoge en el círculo estrechísimo de lo conocido, y cierra adrede los ojos del alma al mundo suprasensible. La idea del infinito (observa Pasteur), sistemáticamente excluida por el positivismo, es estímulo latente y poderoso de toda investigación científica. De aquí se sigue que la ciencia es naturalmente religiosa, y el positivismo (aunque esto no lo entiendan ciertos críticos), es esencialmente ateo.”*<sup>14</sup>

Para Caro el cristianismo había depurado y embellecido tanto el tipo ideal y moral del hombre, que era imposible separar las creencias religiosas del arte. Por ello se preguntaba en relación con Isaacs: *“Para ser buen poeta o buen artista nada importa ser creyente o ateo?”* Su propia respuesta era la de que resultaba imposible que un poeta, autor de un *“idilio en prosa”* calificado por él como una mala novela, y a la vez capaz de representar en su depravada imaginación a los hijos de Dios, simplemente, *“como a bípedos nietos del gorila”* pudiese concebir una Beatriz como la del Dante, o pintar una Virgen como las de Murillo.

Monseñor Juan Buenaventura Ortiz, obispo de Popayán entre 1888 y 1894, fue uno de los mayores opositores a la teoría de Darwin. Al respecto dedicó tres artículos a comentarios relativos a los escritos de del Abate Moigno, quien había planteado que los textos de los libros sagrados estaban acomodados al sentir de las gentes y no al rigor de una verdad científica. En el primero de sus comentarios se ocupa de *Los Esplendores de la Fe*<sup>15</sup>. El comentarista parte de la premisa de que una parte de la humanidad aspira a ser maestra del resto mediante la supresión de lo sobrenatural, tratando de destronar a Dios a través de un lenguaje moderno denominado *ciencia*. Para Ortiz, la ciencia disputa a la fe el dominio de las almas, pues pone en tela de juicio el hecho de una creación general y sosteniendo la creación inmediata de las especies y del hombre, pretendiendo hacer a este descendiente de los animales. Para él la ciencia no puede aventurar más que conjeturas e hipótesis más o menos probables, pero nunca de todo punto ciertas.

En un aparte señala Monseñor Ortiz:

*“Los sabios han puesto al frente de esta noción (creación del hombre) varias teorías, según las cuales el hombre actual proviene, no de un primer hombre criado por Dios, sino del mono, ya por la variación lenta e indefinida de las especies, como quiere Lamarck, ya por vía de evolución como asegura Huxley, ya por selección como imagina Darwin. La teoría de este último es la que ha adquirido mayor celebridad, y su libro del Origen de las especies anda de manos de muchos, y por eso el análisis y refutación que hagamos se limitarán a Darwin y a su sistema.”*<sup>16</sup>

Tras en anterior comentario, el autor se dedica a refutar a Darwin con diversos argumentos que se centran en los siguientes axiomas: todo ser vivo se reproduce en otro de su misma especie y aunque las especies se distinguen por caracteres fisiológicos no pueden sufrir ningún tránsito a otras, como Darwin supone. Los restos antiguos hallados en las entrañas de la tierra a especies extintas análogas a las actuales o son de las mismas que hoy habitan la tierra y las especies superiores han coexistido con las inferiores desde el principio de los tiempos. Los ensayos hechos mediante hibridación o cruce para obtener seres nuevos

13 Ibid. p. 348.

14 Ibid. p. 308.

15 Ortiz, J.B. Los esplendores de la fe. *Repertorio Colombiano* 7(39): 198 - 225. 1881. 7(42) 377 - 401, 8(43):58 \_ 78.

16 Ibid. 7(39): 221.

comprueban la imposibilidad del hecho que Darwin da como base de su sistema. En el segundo de sus ensayos y luego de múltiples argumentos en contra de unos cuantos geólogos y antropólogos reitera con énfasis que resulta absurdo llamar ciencia a un tejido de afirmaciones arbitrarias, de hipótesis gratuitas sostenidas a fuerza de audacia y mala fe es un abuso que hace aparecer como dictados fastuosos cosas pequeñas y malas que lucen a los ojos de los poco avisados como grandes y buenas.

Rafael Núñez, otro señalado pensador e ideólogo conservador se ocupó del tema darwinista. Su producción poética, aparte de la letra del Himno Nacional, es poco conocida y sus poemas han recibido de la crítica, desde vituperios y comentarios corrosivos, que parecen escritos no con tinta sino con vitriolo, hasta elogios desmesurados y poco objetivos. Su poesía es de tipo romántico pero, por su temática resulta comprometida. No es del caso juzgar acá la obra poética de Núñez sino recordar que entre sus poemas figura el titulado: *Darwin*, obra en la que fija su posición en relación con la teoría de la Selección Natural y sobre el concepto de la evolución, lo cual hace a través de metáforas interesantes que se oponen por completo al concepto de la supervivencia del más fuerte o del más apto. Se trata de un juego de ideas en el que prima un sentimiento, un concepto central, sobre cualquier pulimento en la rima o en la musicalidad de los versos. Sin duda el poema fue compuesto, más para dejar constancia de su verdad que para crear versos perdurables.

Dice los versos:

### **DARWIN**

*Si es lote del más fuerte la victoria,  
¿Cómo fue que a Goliat David venció?  
¿Por qué es de Francia Juana de Arco gloria?  
¿Cómo Franklin el rayo encadenó?*

*Newton tenía la visión más clara,  
Y al hallar la atracción, la gravedad,  
Hasta Dios remontó la ciencia ignara  
Del motor de la astral inmensidad.*

*Si más que el mártir el verdugo es fuerte,  
¿Por qué el mártir las almas conquistó?  
Y a través de los siglos y la muerte,  
Su figura de luz sobrenadó?*

*Te seducen contornos exteriores,  
Los pesas y los mides, y ..... ¿No hay más?*

*Desconoces virtudes interiores  
Que no admiten balanza, ni compás.*

*¡Pobre sabio! más grande me parece  
Que la tuya la ciencia de Pasteur;  
Pues si lo corporal se desvanece  
Se deja lo invisible comprender.*

*Y el gran problema entonces orillamos,  
Como a medias lo dijo Calderón:  
Nuestra vida es un sueño, y despertamos  
Del inmenso misterio en la emoción.*

*La forma es como el arco de la flecha,  
Como alambre de oro del laúd,  
Lo que en breve se rompe y se desecha;  
El impulso es la eterna juventud.*

*Las ideas también tienen su fuego,  
Y fuerza, movimiento, sed, pasión.....  
Es el mundo no más apoyo ciego  
De la interna sagrada evolución.*

No podía ser otra la posición del doctor Núñez acerca de la evolución. Recordemos que el país vivía un periodo de hegemonía conservadora y que la Constitución de 1886 acababa de entrar en vigencia luego de una época plena de convulsiones políticas. El intelectual gestor de la reforma política hacía gala de su recia personalidad y de su bien definida ideología. Su poesía refleja su visión del mundo y sirve para entender su recia personalidad de pensador más que como fuente de valores líricos. Parece haber sido hecha a manera de desahogo intelectual y para dar descanso a su mente de estadista, de hombre calculador y de agudo político.

En contraste con este poema anti-darwinista existe un soneto laudatorio de homenaje al naturalista inglés, obra de uno de los poetas de *La Lira Nueva*. La obra de la autoría de Emilio Antonio Escobar está fechada en octubre de 1883 y dice así:

### **A CARLOS DARWIN<sup>17</sup>**

*Gigante de la ciencia redentora,  
Atleta del humano pensamiento,  
Oh Darwin! tú que con robusto aliento  
Del hombre escribes la primera hora!*

17 Rivas Groot, J.M. *La Lira Nueva*, segunda edición, Biblioteca Colombiana 40: 48-49. Instituto Caro y Cuervo, Santafé de Bogotá 1993.

*Ya el Adán mitológico no llora  
Del Paraíso el triste alejamiento;  
Y fuerte el hombre y de verdad sediento  
Mira el Edén en el futuro ahora.*

*Nuevo Moisés, tu génesis bendito  
Es de una ley revelación sagrada,  
Que sus obras sin fin Natura ha escrito.*

*Ruede en el polvo el religioso mito:  
El Progreso es el fin de la jornada  
Del átomo impalpable a lo infinito!*

El reflejo de la teoría de la evolución en la poesía no es exclusivo de Colombia. El poeta español Gaspar Núñez de Arce, en una clara demostración de su posición liberal compuso una *Oda a Darwin* cuyo texto, curiosamente fue publicado en su totalidad en El Repertorio Colombiano<sup>18</sup> junto con una traducción al inglés realizada por Mary J. Serrano. Las principales estrofas señalan:

*I        ¡Gloria al genio inmortal! Gloria al profundo  
Darwin, que de este mundo  
Penetra el hondo y pavoroso arcano!  
Que removiendo lo pasado incierto,  
Sagaz ha descubierto  
el abolengo del linaje humano!*

*II        Puede el necio exclamar en su locura:  
"Yo soy de Dios hechura"  
Y con tan alto origen darse tono.  
¿Quién, que estime su crédito y su nombre,  
no sabe que es el hombre  
La natural transformación del mono?*

*III        Con meditada calma y paso a paso  
Cual reclama el caso,  
Llegó a tal perfección el mono viejo;  
Y la vivaz materia por sí sola  
Le suprimió la cola,  
Le ensanchó el cráneo y le afectó el pellejo.*

*IV        Esa invisible fuerza creadora,  
Siempre viva y sonora,  
Música, verbo pensamiento alado;  
Ese trémulo acento en que la idea  
Palpita y centellea  
Como el soplo de Dios en lo creado;*

*V        (Hablo de Dios porque lo exige el metro,  
Mas tu perdón impetro  
¡Oh formidable secta Darwiniana!)  
Ese sonido, como el sol fecundo,  
Que vibra en todo el mundo  
Y resplandece en la palabra humana;*

*VI        Esa voz, llena de poder y encanto,  
Ese misterio santo,  
Lazo de amor, espíritu de vida,  
Ha sido el grito de la bestia hirsuta,  
En la cóncava gruta  
De los agrestes bosques escondida.*

*VII        Ay! si es verdad lo que la ciencia enseña,  
¿Por que se agita y sueña  
El hombre de su paz fiero enemigo?  
¿A que aspira? ¿Qué anhela? ¿Qué es en suma,  
El genio que le abruma?  
¿Fuerza o debilidad? ¿Premio o castigo?*

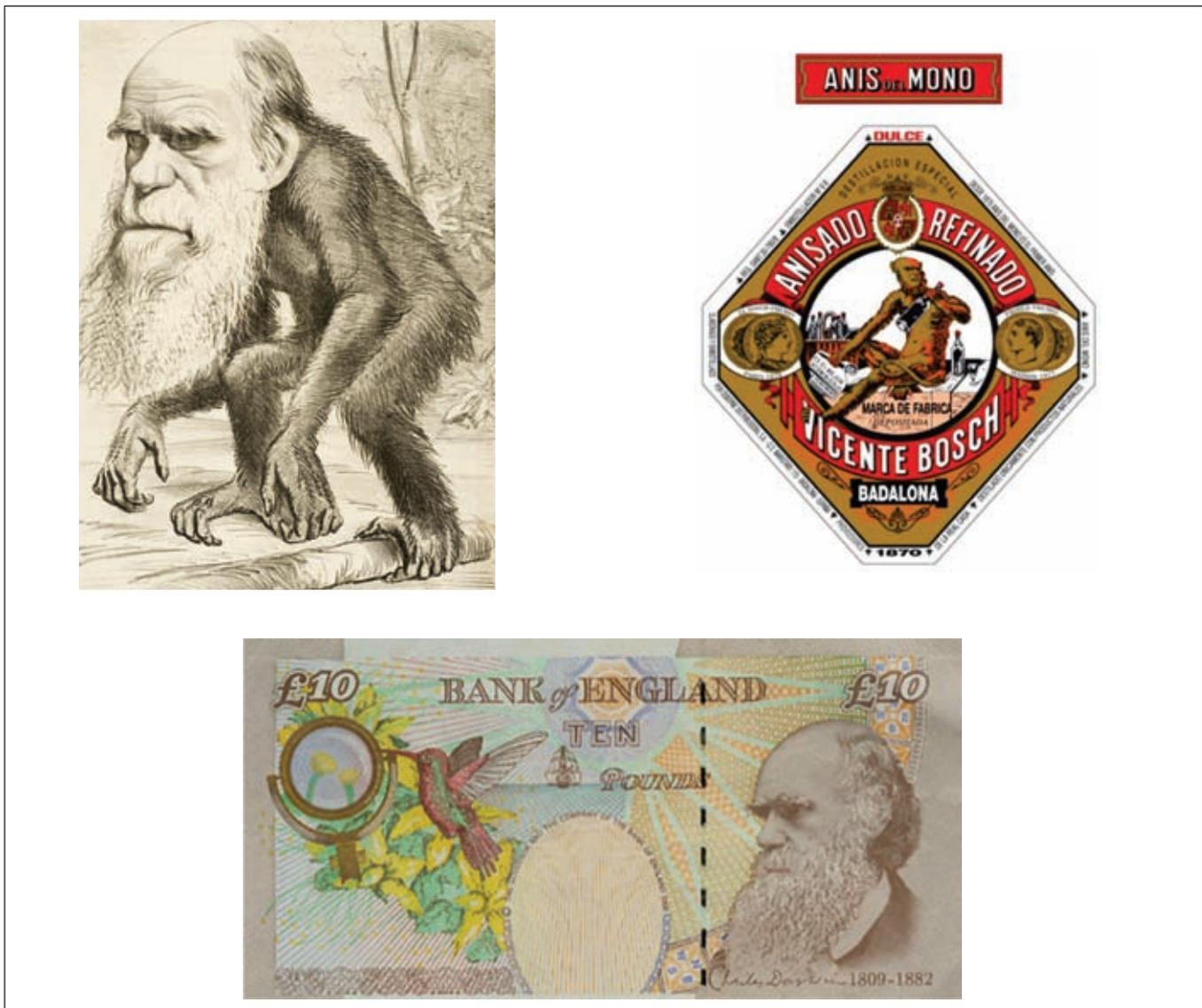
*X        Ajeno a todo inescrutable arcano,  
Nuestro Adán cuadrumano  
En las selvas perdido y en los montes,  
De fijo no estudiaba ni entendía  
Esta filosofía  
Que abre al dolor tan vastos horizontes.*

*XVIII    En la copa de un árbol suspendido  
Y con la cola asido,  
Extraño a los halagos de la fama.  
Sin pensar en la tierra ni en el cielo.  
Nuestro inocente abuelo  
La vida se paso de rama en rama.*

*XVIX    Tal vez enardecida y juguetona,  
Alguna virgen mona.  
Prendióle astuta en sus amantes lazos,  
Y más fiel que su nieta pervertida,  
Ni le amargó la vida,  
Ni le hirió el corazón con sus abrazos.*

*XXI        Allí donde la gran naturaleza  
Descubre la belleza  
De su seno inmortal, siempre fecundo,  
En deliquios ardientes y amorosos,  
Los dos tiernos esposos  
Engendraron el árbitro del mundo.*

*XXII        ¡El árbitro del mundo!.... ¡Que sarcasmo!  
Pedido el entusiasmo,  
Sin esperanza en Dios, sin fe en sí mismo,  
Cuando le borre su divino emblema  
Esa ciencia blasfema,  
Como la piedra rodará al abismo.*



**Figura 1.-** En todo el mundo la recepción de la teoría de la evolución se prestó para sátiras y para reconocimientos por parte de la sociedad. Ejemplo de los sarcasmos son la caricatura de la izquierda así como la marca de un licor español pomposamente llamado **Anís del Mono**, en cuya etiqueta figura un simio con la cara del naturalista. En la parte inferior se ve la efigie de Darwin ornando los billetes de diez libras en el Reino Unido.

Al igual que en Colombia, en otros países, la Teoría de la Evolución y su autor fueron satanizados por algunos sectores. En España entró al mercado una marca de aguardiente anisado a la cual su productor, Vicente Bosch, no vaciló en ponerle “*Anís del Mono*”, adornando la etiqueta con la imagen de un simio con la cara, un tanto caricaturizada, de Darwin. Esta marca ya lleva más de cien años en el comercio y su etiqueta no ha variado. Muchas han sido las caricaturas dedicadas al naturalista inglés cuya mejor reivindicación la constituye la inclusión de su imagen en los billetes de cur-

so legal en el Reino Unido, aparte del reconocimiento universal de su teoría en el dominio de las ciencias. (Figura 1).

Retornando al ámbito colombiano, en un opúsculo titulado *La religión al alcance de todos. Refutación al libro de Ibarreña*,<sup>19</sup> publicado en Popayán en 1893,

<sup>19</sup> Ortiz, J.B. *La Religión al alcance de todos. Refutación al libro de Ibarreña*. Edición oficial. Imprenta del Departamento, 136 pp. Popayán. 1893.

encontramos varios comentarios alusivos a la evolución y que ilustran la posición de muchos clérigos y en general de la Iglesia Católica de entonces. El opúsculo recoge algunos artículos publicados en *La Semana Religiosa*, semanario en el que también se dieron a conocer algunos artículos similares de Monseñor Rafael Celedón, Obispo de Santa Marta entre 1891 y 1902. El autor de los escritos que comentamos es el ilustrísimo señor Juan Buenaventura Ortiz, a quien ya habíamos mencionado por sus comentarios sobre los escritos del Abate Moigno. El eje de esta nueva publicación es el de refutar una obra publicada en España por Rogelio Herques Ibarreta, más conocido como R.H. Ibarreta. Dicho autor, calificado por Monseñor Ortiz como blasfemo y “*agente del anticristianismo ultramarino*”, fija su posición frente a las doctrinas de la Iglesia mediante un paralelo entre las Sagradas Escrituras y obras recientes de geología e historia natural. No en vano Ibarreña, ateo confeso y escritor irreverente había sido excomulgado por la Iglesia.

Monseñor Ortiz señala que *La religión al alcance de todos*, obra de Ibarreta persigue el mismo fin que la de Renán, es decir, la de hacer aparecer los evangelios como una fábula absurda y ridícula, y a los propagadores del cristianismo como tontos o embaucadores. En el segundo de los artículos transcritos Ortiz se ocupa de la parte pertinente a los textos de carácter científico. Ibarreta, a su juicio, “*da al transformismo por verdad averiguada y demostrable*”, al enseñar cómo en el curso de muchos millares de siglos, la simple evolución de la materia fue perfeccionando los frutos de esa misma materia hasta hacerla producir el hombre, una simple máquina de pensar formada, como todo lo demás, en virtud de una ley sin autor y asegurando que fue Dios quien mencionó como las plantas se convirtieron en animales y los animales en hombre. Añade Monseñor Ortiz:

“*El cambio de unas especies en otras por lo que llaman selección natural, es una pura fábula que tenemos el derecho de llamar tal mientras no se den de ellas otras pruebas que algunos hechos aislados y siempre mal estudiados; mientras estas pruebas no se parezcan, la fijeza de las especies será una verdad científica.*”<sup>20</sup>

Más adelante señala que Ibarreta tiene razón al escoger a los aldeanos para enseñarles darwinismo<sup>21</sup>,

porque entre gentes más letradas la fábula del evolucionista no puede tener mayor crédito y que su lujo de erudición darwinista corre pareja con el de su instrucción cosmográfica. Argumenta que el autor desvaría al plantear que la tierra en un principio estaba hecha de ascua y que en el transcurso de millones de años esa incandescencia se fue enfriando hasta formarse una costra sólida cada vez más gruesa y que los animales, las plantas y el hombre son producto de esa tierra. Para el prelado, en esta teoría biológica no cabe Dios y los argumentos mencionados sólo buscan destruir la idea del alma y la fe de la humanidad a través de un recuento de diferentes clases de seres, recuento que empieza en los seres que se consideran más imperfectos y acaba en el hombre.

Para el Obispo de Popayán, el autor comentado se equivoca al plantear que el carbón de piedra procede de los vegetales calcinados por las conmociones volcánicas y que hay algunas razas de animales extinguidas y que eso es prueba de que el hombre desciende de las bestias, porque estas se perfeccionan. El único mérito que le acredita es el de exponer con más claridad argumentos que otros filosofadores de su escuela como Tracy, Darwin, Lamarck y Spencer no han logrado.

El trabajo más extenso que hemos encontrado en relación con la recepción en el país de la teoría de Darwin se debe a Emilio Cuervo M. y fue publicado en 1891 en Bogotá. Se trata de un opúsculo titulado *Estudio sobre el Sistema Evolucionista*<sup>22</sup>. Esta obra mereció el primer premio en un concurso filosófico organizado en el Colegio Mayor de del Rosario de Bogotá. El evento fue promovido por Monseñor Rafael María Carrasquilla, quien regentaba la cátedra de Antropología y Metafísica; el tema propuesto fue el de presentar una tesis sobre el sistema evolucionista comparándolo con la doctrina monogénica de la Sagrada Escritura. Los estudiantes dispusieron de dos meses para preparar sus tesis que fueron calificadas por un jurado designado por el rector e integrado por los catedráticos de Metafísica, Lógica y Física experimental, en su orden Monseñor Carrasquilla, Gabriel Rosas y Lorenzo M. Lleras. Después de leer las diversas composiciones concedieron el premio, consistente en la impresión de

de ejemplares de su obra a los mineros y agricultores de la región aragonesa.

22 Cuervo, E. *Estudio sobre el sistema evolucionista*. Imprenta de la Luz, 74 pp. Bogotá.

20 Op. cit. p. 11.

21 Ibarreta era pudiente y para desafiar a la Iglesia regaló cientos

250 ejemplares, al trabajo distinguido con el tema: *Et creavit Deus hominem ad imaginem suam: ad imaginem Dei creavit illum, masculinum et foeminam creavit eos*. El jurado consideró esta tesis como de largo aliento y mérito superior a las demás por corresponder a un estudio concienzudo de muchos y diversos autores de ambas escuelas.

El autor presenta, a través de doce apartados la teoría de la evolución mediante diversos argumentos que refuta paso a paso desde una óptica puramente filosófica, esto a pesar de haber consultado varias obras de historia natural. En la bibliografía figuran sesenta obras de distintos autores entre quienes además de Darwin figuran Cuvier, Haeckel, Laplace, Pasteur, Lamarck, Humboldt, Figuier Geoffroy y Schmidt así como Alexandre Guiraud, Auguste Laugel, Fernand Papillon, James C. Pritchard, Alfred Maury, Frédéric Schlégel, Albert Reville, Du Clot, José Prisco, Gaston Bussier y Brinton. Obviamente en esta bibliografía aparecen varias ediciones de la Sagrada Biblia acompañadas de varias obras antropológicas.

El trabajo de Emilio Cuervo es el primero que corresponde a una discusión en el ámbito universitario. Los anteriores, como hemos visto, se debían a opiniones políticas o religiosas o a manifestaciones literarias, que inevitablemente están implícitas en el texto que comentamos. El primer párrafo es bien dicente de los objetivos perseguidos por el autor, pues en él marca el terreno de su disertación. Allí señala:

*“Es sin duda el Darwinismo una de las teorías más ingeniosas que jamás se hayan inventado, y es de admirar en él cómo Darwin llevó el análisis hasta el colmo, desmenuzando y observando con una constancia admirable cada uno de los seres organizados, aduciendo a cada instante multitud de ejemplos con el objeto de resolver el problema, por tanto tiempo discutido, del origen de las especies”<sup>23</sup>*

Indirectamente reconoce la aplicación del método científico, pero califica la teoría de invento y no de deducción y más adelante asegura que el fundador del darwinismo era presa de la inseguridad en cuanto a sus aseveraciones al plantear con honrosa ingenuidad que *“sólo por la exposición y la discusión de los hechos y argumentos relativos a las distintas fases de*

*la cuestión, se puede llegar a un resultado exacto y semejante trabajo es aquí imposible.”* Esta cita tomada de la introducción de la obra de Darwin se coloca fuera de contexto para restar fuerza a la hipótesis. El análisis es puramente filosófico y no se valora en el terreno de la biología que era donde debía entenderse. En tal ámbito Cuervo considera a los naturalistas partidarios de la evolución como *“filósofos evolucionistas”* que niegan a Dios y predicen que es la fuerza de la materia la engendradora de esa misma materia. Él mismo sintetiza el darwinismo, *“en su idea más simple”* en el principio de que todas las formas vivientes proceden, por la vía de la transformación, de un reducido número de formas originales, que quizás se reduzcan a una sola primitiva. Esta cita tan sencilla era la que había que entender y analizar, tarea difícil y que implicaba un amplio conocimiento de la naturaleza y de mecanismos biológicos que aun se ignoraban o no se conocían a plenitud y menos en el ámbito colombiano.

El trabajo de Cuervo tiene el mérito de estar presentado en forma didáctica y lógica. Incluye una introducción en la que se ocupa de los antecedentes históricos de la evolución para analizar en doce capítulos el origen atómico del mundo, la aparición de las primeras especies y el tránsito de la vida vegetal a la vida animal, la selección natural, la lucha por la vida, el uso y desuso de los órganos, el cruzamiento, las analogías, el mono y el hombre y sus diferencias anatómicas, la inteligencia y el lenguaje, el origen de los átomos y sus movimientos, la generación espontánea, Pasteur y sus trabajos, los híbridos, los animales salvajes y los domésticos y los fósiles.

Cuervo concluye que la libertad es la facultad que tiene el hombre para obrar por lo que es responsable de sus acciones y que para Darwin el hombre es simplemente un animal perfeccionado en el cual el instinto está más desarrollado. Por otra parte señala: *“siempre me ha causado admiración oír a los evolucionistas republicanos pedir a gritos la libertad”* en el obrar en el sufragio y en el pensamiento... *“Dejen pues, los partidarios de la evolución que merced a la selección y a la lucha por la vida, se mejore la especie; todos somos animales perfeccionados, todos debemos medirnos con la misma vara.”*

Concluye sus argumentos con el siguiente dictamen:

*“Profundizando esta cuestión, claros se ven los funestos resultados que trae consigo la implantación de las máximas evolucionistas: la socie-*

23 Op. cit. p.11.

*dad y la familia se destruyen; la ley es un mito; la filantropía queda anulada y la divina máxima evangélica de "amaos los unos a los otros" desaparece en la fosa común donde yacen las ilusiones de los pueblos."*<sup>24</sup>

Tras este categórico veredicto se refiere a algo que nos recuerda lo que señalaba el señor Caro. Bajo el punto de vista de la poesía, de la utilidad, del sentimiento, de la moral y del patriotismo, estas teorías utilitarias, cuanto se apartan de la religión del Crucificado que encuentra nuestro origen en las manos de Dios y no en las tinieblas de los tiempos.

Lo interesante de los argumentos expresados por Cuervo es que muestran como, en el ámbito universitario local, se tocó el tema con seriedad y como en las bibliotecas se disponía de bibliografía abundante, suficiente para entender y discutir la teoría y tomar partido al respecto.

Cabe recordar que uno de los jurados del trabajo de Cuervo, Monseñor Rafael María Carrasquilla es el autor del libro *Lecciones de Metafísica y Ética*, lecciones que impartió durante varios años en el Colegio Mayor del Rosario. Al ocuparse de la Cosmología trata lo que denomina Sistemas moistas (del griego monos = uno) sobre el origen de las especies. Allí indica que el transformismo darwinista no pertenece a la metafísica sino a la historia natural, pero como con el tema ha invadido los dominios de la filosofía en preciso examinar sus doctrinas, que no se oponían en nada a la fe católica, como había dictaminado Monseñor Zeferino González, hasta cuando Haeckel lanzó la idea de que el hombre descendía del cuadrumano con lo cual animó a Darwin a tratar el problema antropológico, añadiendo a sus teorías principios como el de que el hombre procede por selección de alguno de los cuadrumanos del antiguo continente.<sup>25</sup>

Como ya se ha indicado, muchos de quienes entonces argumentaron en contra de la teoría de la evolución, se equivocaron al ver las hipótesis evolutivas sólo con una óptica filosófica o apologética. Estas teorías debían analizarse desde un punto de vista eminentemente biológico o naturalista y no como un problema de fe.

Tampoco estos conceptos se podían sacar de contexto porque perdían claridad y objetividad. Era menester entender, como lo dedujo Darwin, que los patrones de distribución geográfica dependían de los tipos de locomoción y dispersión de las especies, y que las barreras que aislaban unas poblaciones de otras resultaban determinantes. Las especies tenían un único lugar de origen a partir del cual podían dispersarse. Si una especie se extinguía, su desaparición se debía a la competencia con sus congéneres y no a simples cambios climáticos. En consecuencia, las poblaciones actuales eran descendientes de especies ancestrales que les habían legado sus atributos. El aislamiento de una población resultaba determinante para fijar esos atributos. Al entender estos procesos se fue comprendiendo la evolución como un fenómeno contingente. Las variaciones podían ser espontáneas pero no necesariamente tenían que ser aleatorias.

En un terreno más apacible, un pensador y ensayista destacado, Carlos Arturo Torres al tratar, en *Idola fori*, la historia de las ideas se refiere a Darwin y a la influencia de su obra con palabras más objetivas que reflejan la manera como la comunidad intelectual fue aceptando y asimilando las nuevas ideologías. En el capítulo titulado "*Evolución y Unidad Mental*" comenta una carta del escritor francés Paúl Bourguet y transcribe el siguiente comentario:

*"La misma dialéctica que en el orden biológico lleva al doble principio de la evolución (Darwin) y de la constancia (Ley de Quinton) llega en los dominios morales a un acuerdo entre la conciencia reflexiva y la costumbre entre la razón y la tradición."*<sup>26</sup>

En el siguiente capítulo, "*La rotación de las ideas, el concepto científico*" desarrolla este pensamiento con el siguiente comentario:

*"El transformismo y la evolución fueron con todas sus deducciones y sus datos colaterales los principios modeladores del pensamiento, la fuente suprema de inspiraciones en la literatura de ideas de la segunda mitad del siglo XIX: la doble concepción de Darwin y de Spencer domina casi exclusivamente, no tan solo el campo de las ciencias naturales y de la filosofía, sino*

24 Ibid. p. 72.

25 Carrasquilla, R.M. *Lecciones de Metafísica y Ética, dictadas en el Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario*, pp. 233 – 134. Imprenta de la Luz, Bogotá. 1914.

26 Torres, C.A., *Idola fori* en *Obras*. Instituto Caro y Cuervo, Biblioteca Colombiana 18. Tomo I, p.18. Bogotá 2001.

*la integridad del movimiento intelectual de media centuria. Esos principios exagerados por los espíritus de segundo orden y por los de todo orden aplicados a las mas remotas regiones de la actividad mental, llegaron a convertirse en dogma ennoblecido por sus apóstoles, desvirtuado y empequeñecido por sus fanáticos, ásperamente combatido por sus adversarios, pero de un prestigio innegable y de una importancia capital como fuerza directiva de las ideas. La moral, la política, la sociología buscaban allí sus orientaciones definitivas; la historia, la literatura y la estética se modelaban sobre aquellas nociones que, verificadas en un orden exclusivo de hechos científicos, el de la anatomía, aparecían con el fin de todos los fenómenos vitales en todos los dominios del conocimiento. Hoy se advierte una intensa modificación en las corrientes intelectuales; en la esfera de las ciencias naturales M. Quinon, y en la filosofía M. Bergson, presentan puntos de vista enteramente nuevos que complementan, limitan y fijan en su verdadero valor, éste la concepción de Spencer, aquel la de Darwin.*<sup>27</sup>

Una defensa más categórica de Darwin y de su teoría es la que hace Torres en un escrito titulado *Diletantismo Científico*<sup>28</sup>. Allí aclara que es un error general el creer, como aparece en varios artículos y en los versos de Núñez de Arce, que Darwin hubiese dicho, en alguna de sus obras, que el hombre desciende del mono, una interpretación ligera y apasionada. Igualmente aclara las diferencias entre la selección natural y el proceso evolutivo, rectifica errores de interpretación e interpreta la evolución una ley soberana que abarca no solo al mundo orgánico sino a la totalidad del proceso cósmico desde la formación de las nebulosas hasta la transformación de los recuerdos. Allí la energía, infinita y eterna se manifiesta en todas partes y por modos siempre diferentes. Concluye señalando que este entendimiento muestra que está llegando para el mundo una época en la que varios ramos del conocimiento humano, junto con sus aplicaciones van a tener aplicaciones gubernativas, sociales y políticas para convertirse en patrimonio de todas las inteligencias; en este amplio universo el despotismo y la persecución darán paso al respeto y a la tolerancia.

27 Ibid. p. 37.

28 Torres, C.A., *Diletantismo científico* en *Obras*. Instituto Caro y Cuervo, Biblioteca Colombiana 19. T II: 275 – 286. Allí comenta detalladamente un artículo titulado *Los peces de Amatitlán*.

Años más tarde, en la antesala de unas votaciones presidenciales y en medio de un ambiente político caldeado se produjo un hecho que finalmente se trivializó y por ello no tuvo ninguna repercusión en el ámbito científico, aparte de dar lugar a numerosas caricaturas y a comentarios burlescos. Este hecho no generó ningún impacto en la opinión general ni afectó unas elecciones en las cuales el partido liberal se presentó dividido, permitiendo el triunfo conservador. El 20 de marzo de 1946 fue inaugurado el Instituto de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional. Durante el acto el profesor Luis López de Mesa, reconocido intelectual y psiquiatra, excanciller y exministro de Educación de la administración del presidente Eduardo Santos pronunció una conferencia titulada: “*Los elementos constitutivos del yo*” en la que trató tangencialmente la teoría de la evolución. El partido liberal estaba dividido. Al día siguiente el periódico *El Espectador* destacó como el expositor había asegurado que: “*el hombre descendía de la sardina*”. En cambio *El Tiempo* indicó que había sido una “*hermosa y sugestiva conferencia*”. Un día más tarde, *El Siglo* publicó un sarcástico poema de la autoría del médico Hernando Martínez Rueda, “Martínón” titulado “*Nadando en seco*”. La polémica creció al pronunciarse el arzobispo de Bogotá, Monseñor Ismael Perdomo a través de una carta enviada a Germán Arciniegas, ministro de Educación. En el texto del arzobispo primado lamentaba que se expusiesen en la Universidad:

*“anticuadas hipótesis que tratan de explicar el origen del hombre mediante un falso evolucionismo, en abierta oposición con las enseñanzas católicas sobre la materia.”*

A raíz de estos comentarios y del presunto escándalo suscitado, el profesor López de Mesa restó importancia al incidente y lo tildó como: “*La tempestad de la sardina*”. El texto leído fue publicado meses después en la *Revista de América*<sup>29</sup>, una publicación mensual editada por *El Tiempo* bajo la dirección de Germán Arciniegas y Roberto García Peña. En la nota de presentación se señala: “*Ha habido quien dude no sólo de la verosimilitud de la historia sino de la realidad y conveniencia de la misma*” para añadir que el erudito ensayo no era sólo la defensa de la historia sino la demostración de que existe una filosofía de la historia lograda a través de un auténtico raciocinio.

29 López de Mesa, L. 1947. *El sentido de la historia*. Revista de América 27:289 – 310. Marzo..

El párrafo que dio lugar a los comentarios de prensa y que obviamente fue sacado del contexto para hacer alusiones peyorativas e incluir la frase alusiva a la sardina y que no aparece en ninguna parte del texto, señala:

*“Partiendo de aquellas circunstancias que por mutación biológica y lenta adecuación al medio ambiente de su existencia el pre-hombre se hizo hombre, cualquiera que sea la “phyle” o cadena genealógica de la especie que aceptamos para dicha evolución, cosa que aquí no importa definir por el momento, y aceptando lo que se ha dicho acerca de los primeros hallazgos espontáneos con que ese hombre de aquellas nebulosas edades enriqueció su capacidad de defensa e inició el ejercicio interpretativo e inventivo de la mente, tenemos que reconocer que su asociación en grupos más y más amplios, su agrupamiento, pues en sociedad, así fuese todavía rudimentaria y transeúnte en ocasiones, constituyó el estímulo supremo para la invención de otros recursos y el pausado advenimiento de la cultura.”<sup>30</sup>*

Fue esta una la polémica, eminentemente política y dogmática. En ella intervinieron entre otros el reconocido botánico Enrique Pérez Arbeláez a través de *El Tiempo* y el periodista Julio Abril a través de *El Siglo*. Éste último indicó burlescamente que era más decoroso descender de la sardina, de *“la familia de las lampreas, una excelente familia”* y no del mono como había dicho Darwin. Este curioso acontecimiento fue excelentemente comentado por Diana Obregón (1992), quien transcribe los satíricos versos de Martínez Rueda que incluimos a continuación:

*“Un pez braquióptero cierto día  
aburrido en el líquido elemento  
para emplear en algo su talento  
se dedicó a estudiar filosofía.  
Al descubrir que un mundo seco había  
donde en vez de agua se respira viento  
intentó el peligroso experimento  
de ver como en la tierra viviría.  
Dice la historia que la tal sardina  
al elevarse de su medio ambiente  
murió, como cualquiera, lo imagina.  
Y no puede caernos de sorpresa*

*que algo así le suceda de repente  
al ilustre doctor López de Mesa.”<sup>31</sup>*

Quiero concluir estos comentarios reiterando que la teoría de la Evolución debía ser entendida como un concepto biológico y no como una tesis filosófica. El universo es una génesis constante y debe ser asimilado entendiendo una renovación permanente en la que el intercambio genético permite una enorme variabilidad y que la segregación genética funciona en forma aleatoria e independiente. Era necesario asimilar el concepto de evolución en su sentido más coherente y profundo. Los fenómenos naturales debían verse con objetividad y sin apasionamientos, más aun esa génesis constante de la vida que cambia y se hace más compleja merced a la segregación de factores mediada por la meiosis y recombinación logradas a través de la reproducción sexual, factores medidos en el fiel del medio ambiente a través del tiempo. Ascenso lento desde el pasado hacia un presente que se proyecta en un futuro merced a la supervivencia de las especies en un medio determinado. Tras el estallido que crea el Universo aparece la vida y de un mundo atomizado en sus orígenes se llega a un mundo organizado y en progresiva dispersión mediante una concatenación de dependencia y continuidad física entre las formas organizadas. La materia se anima, se hace más compleja. Las verdades nuevas son difíciles de expresar y cuando se exponen por primera vez pueden ser incomprendidas. Al respecto señalaba Teilhard de Chardin:

*“Para juzgar con equidad las teorías transformistas, es preciso tener en cuenta que no son ajenas a la ley de conquista progresiva que rige la génesis de toda idea nueva. Si hoy es indiscutible que durante el último siglo, en tiempo de Lamarck, Darwin y sus innumerables discípulos, se vio brillar frente a ellos una luz auténtica, no es menos evidente para nosotros que, en los intentos por ellos realizados para aprovechar esta luz, fueron muchos los esfuerzos que no lograron la meta. Las primeras generaciones de transformistas no supieron definir con exactitud lo que había de esencialmente nuevo, a la vez que estrictamente biológico, en las insospechadas relaciones que ellos iban descubriendo en el seno de la naturaleza. Sus puntos de vista, muchas veces geniales, se mezclaron con de-*

30 Op. cit, p 201.

31 Obregón, D. 1992. *Luís López de Mesa y Monseñor Perdomo. La tempestad de la sardina*. Credencial Historia 31: 12-14.

*masiadas explicaciones caducas y basadas en una filosofía falsa.*<sup>32</sup>

Estos comentarios sobre la recepción de la teoría de la selección natural no buscan menospreciar a nadie ni minimizar cualquiera de las opiniones o manifestaciones literarias que se produjeron en torno al concepto de la evolución. Sólo tratan de explicar como en nuestro país se fue asimilando, lentamente, el concepto de la evolución. La teoría llegó en un momento histórico lleno de complejidades políticas y de contiendas partidistas en las que, apartándose de los mandatos divinos, la Iglesia local se inmiscuyó indebidamente en el manejo del estado. Ese ambiente caldeado influyó mucho en esa lentitud. Finalmente, analizándola como se debía, y sin mojigaterías, la teoría fue aceptada. Era inevitable acogerla.

Hoy se entiende a las especies, no como clases o grupos de cosas que comparten unos atributos, sino como poblaciones cuyos individuos interactúan entre sí y participan de un legado genético. Los más aptos se nutren mejor y por ello tienen mayor oportunidad de legar una descendencia. El éxito individual afecta las propiedades de la especie al alterar la proporción de sus individuos de una población. Las variaciones no son simples diferencias sino verdaderas adaptaciones.

La evolución ocurre porque los organismos se transforman en el tiempo merced a las adaptaciones positivas. Entendida la evolución se planteó la filogenia como un mecanismo que muestra la historia de los seres vivos con sus cambios y sus adaptaciones al ambiente.

La teoría de la Selección Natural dio fama y reconocimiento universales a su autor y cambió el curso de la biología al renovar la visión del hombre sobre ese universo donde convive con innumerables organismos, todos producto de un lento, prolongado y complejo proceso evolutivo. Con esa interpretación innovadora se enriqueció la causa del materialismo científico y se comprobó que las ideas podían ser inteligibles en un marco naturalista dinámico. Era este un nuevo orden de principios para la aprehensión mental de la naturaleza, opuesto completamente a la visión de la teología, basada en un hecho milagroso con fundamento en la fe. Era apenas natural que esa nueva concepción generase resistencia en el medio colombiano de entonces.

Recibido: Febrero 3 de 2012.

Aceptado para su publicación: Marzo 2 de 2012.

32 Teilhard de Chardin, P. de. *La visión del Pasado*. 19. Taurus, Madrid, 1966.

## APLICACIONES DEL MODELADO MATEMÁTICO EN PROBLEMAS ENERGÉTICOS: UN RECORRIDO DESDE LA INVESTIGACIÓN A LA CREACIÓN DE EMPRESAS

Pedro Fernández de Córdoba Castellá\*

### Resumen

**Fernández de Córdoba Castellá P.:** Un recorrido desde la investigación a la creación de empresas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (138): 93-103, 2012. ISSN 0370-3908.

En este trabajo se presentan diversas aplicaciones del modelado matemático a problemas de interés en el campo de la Energía, desarrolladas en el seno de nuestro grupo de investigación. Entre ellas podemos destacar desde el estudio de los sistemas de climatización geotérmica de edificios, la transmisión de calor en el proceso de rectificado industrial o las soluciones fotónicas para aumentar la eficiencia de los paneles solares hasta el modelado del metabolismo de sistemas microbianos para la producción de biocombustibles de última generación.

Así mismo, se hace especial hincapié en un ejemplo de transferencia tecnológica a la sociedad, impulsado desde el grupo de investigación y materializado en la creación de una spin-off: Energe-sis Ingeniería, una empresa que no sólo está implantando sistemas geotérmicos de climatización en edificios, sino que apuesta por una fuerte presencia de las actividades de I+D entre sus tareas centrándose, fundamentalmente, en dos campos: el ahorro energético en la edificación y el uso del suelo como foco de intercambio térmico. Ambos campos requieren el despliegue de sofisticados modelos de simulación numérica, tanto de los intercambios energéticos en edificios como de la transmisión de calor en suelos.

**Palabras clave:** modelado matemático. Sistemas energéticos. Creación de spin-off.

### ABst RACt

This paper presents various applications of mathematical modeling to several problems of interest in the field of Energy, all of them developed in our research group. Among these are geothermal heat pumps, heat transfer in grinding process, photonic solutions to increase the efficiency of solar panels and metabolic modeling of microbial systems for production of next-generation biofuels.

---

\* Doctor en Física. Doctor en Matemáticas. Catedrático de Universidad. Grupo de Modelización Interdisciplinar, InterTech. Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. Vocal de la Junta Directiva de la *Red Española de Matemática-Industria math-in*. Dirección Postal: Departamento de Matemática Aplicada. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n 46022- Valencia - España

Furthermore, we focus on an example of technology transfer to society, promoted by our research group and resulting in the creation of a spin-off: Energesis Engineering, a company that not only is implementing geothermal HVAC systems in buildings, but which is also developing strong R&D activity, mainly on two areas: energy efficiency in buildings and the use of the soil as a focus for heat exchange. Both fields require the development of sophisticated numerical simulation models.

**Keywords:** mathematical modeling. Energy systems. Spin-off generation.

## 1. Introducción

Las investigaciones que se recogen en este trabajo se han llevado a cabo en el *Grupo de Modelización Interdisciplinar, InterTech* ([www.intertech.upv.es](http://www.intertech.upv.es)), un equipo cuyos investigadores están adscritos mayoritariamente al Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada (IUMPA, [www.impa.upv.es](http://www.impa.upv.es)) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV); en este trabajo se presentan algunas áreas de investigación dentro de un proyecto global que mantiene como línea vertebradora el desarrollo de modelos matemáticos avanzados para sistemas de interés en el campo de la Energía. En particular, y dentro de este campo, el proyecto focaliza su actividad en cuatro áreas de manifiesto interés aplicado: el modelado de los sistemas de energía geotérmica, de la transmisión de calor en el proceso de rectificado industrial, de las soluciones fotónicas para aumentar la eficiencia de los paneles solares y el modelado metabólico de sistemas microbianos para la producción de biocombustibles de última generación.

La elección de estos campos de interés dentro del sector energético no ha sido casual, sino que se fundamenta en la motivación del grupo por promover al máximo la transferencia tecnológica desde el ámbito de las Matemáticas. Podemos citar, como ejemplo de este *leitmotiv*, el hecho de que parte de la actividad investigadora del grupo se ha materializado no sólo en aportes teóricos sino en una verdadera transferencia a la sociedad, incluyendo la creación de Energesis Ingeniería ([www.energesis.es](http://www.energesis.es)), una empresa nacida en el seno de la UPV.

A continuación, se presentará brevemente el estado actual de la investigación que el grupo está realizando en este campo, así como algunas de las ideas futuras en las que pretende centrar parte de su actividad.

### 1.a Modelado matemático de los sistemas de energía geotérmica

La energía geotérmica para la climatización de edificios es una tecnología que se basa en el uso del suelo como foco térmico con el cual un edificio puede intercambiar calor, tanto para refrigeración como para calefacción [1,2]. En la estación fría, se absorbe calor del suelo que circunda o sustenta un edificio, para después disipar dicho calor en el mismo edificio. En la estación cálida se invierte el proceso: se extrae calor del edificio y se disipa en el suelo. Ello implica, en particular, un sustancial ahorro energético respecto a las instalaciones térmicas convencionales.

En las instalaciones geotérmicas se intercambia calor con el suelo circundante mediante un conjunto de tuberías. Estas tuberías (“intercambiadores de calor”) forman un circuito cerrado por el que se hace circular un fluido caloportador.

A la hora de diseñar una instalación geotérmica, se deben evaluar las necesidades térmicas del edificio y calcular el número y la geometría de los intercambiadores de calor que serán necesarios para satisfacer esa demanda energética. Por supuesto, para realizar un buen diseño de un sistema de climatización geotérmica, es necesario conocer las propiedades térmicas del suelo donde se va a realizar el intercambio de calor, por ejemplo, su conductividad térmica. Para determinar este parámetro, crítico en el diseño de un sistema geotérmico, se utiliza un laboratorio móvil (*TRT* por sus siglas en inglés) [27-30]. De la importancia de esta tecnología para el futuro desarrollo del aprovechamiento de la geotermia para climatización da fe el hecho de que la Agencia Internacional de la Energía, a través del acuerdo de implementación (*Implementing Agreement*) denominado ECES (*Energy Conservation through Energy Storage*), ha impulsado recientemente un anexo (*Annex 21*) dedicado enteramente al perfec-

cionamiento y difusión internacional de las tecnologías de medida de la respuesta térmica del terreno.

### 1.b Modelado matemático del proceso de rectificado industrial

El rectificado industrial consiste en el pulido de piezas mediante muelas abrasivas que giran a gran velocidad [3]. La investigación sobre este tema tiene una gran relevancia en el ámbito industrial. No es extraño, por tanto, que esta línea de investigación tenga un enorme interés tanto a nivel científico como tecnológico [4]. Durante el proceso de rectificado, la mayor parte de la energía se convierte en calor, el cual se acumula en la zona de contacto entre la pieza y la muela. Las altas temperaturas alcanzadas pueden aumentar, por un lado, la tolerancia del acabado y reducir, por otro, la calidad de la pieza, debido a las tensiones residuales generadas en la misma. El daño térmico de la pieza ocurre cuando las temperaturas generadas en el rectificado superan la temperatura de cambio de fase en la estructura metálica de la misma [5]. Para reducir estos efectos adversos se suele inyectar un líquido refrigerante sobre la zona de contacto entre pieza y muela. De este modo, se disminuye la generación de energía por fricción y al mismo tiempo se refrigera la zona por convección. Además, el líquido refrigerante ayuda a eliminar de la zona de contacto el material extraído de la pieza. La gran desventaja de estos líquidos refrigerantes es que son altamente contaminantes, por lo que la optimización en su uso tiene un gran valor medioambiental y energético. La minimización de la presencia de este líquido refrigerante requiere modelar adecuadamente el proceso de rectificado.

En este sentido, nuestro grupo trabaja en la búsqueda de la evaluación teórica del campo de temperaturas generado en la pieza por la fricción con la muela para evitar el daño térmico de la misma.

Tradicionalmente, el modelo clásico de Jaeger (1942) ofrecía una solución analítica del régimen estacionario del problema de transmisión de calor en el rectificado seco y continuo [6]. Una solución analítica del problema siempre es deseable, pues podemos estudiar cualitativamente la dependencia de la solución en función de los parámetros que influyen en el proceso. Además, la implementación computacional para la representación del campo de temperaturas es mucho más rápida y eficiente que si tuviéramos que resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales que modelan el

proceso de una manera directa. De todas maneras, el resultado analítico debido a Jaeger resulta demasiado limitado, pues no aborda el problema del rectificado con aplicación de refrigerante, ni la posibilidad de estudiar el rectificado intermitente, ni tampoco saber qué ocurre en el estado transitorio, ni cuánto dura éste. Debido al interés del problema, en los últimos años se han dedicado muchos artículos de investigación al análisis de la transmisión de calor en el rectificado industrial de piezas metálicas, modelando el problema mediante sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales que, posteriormente, tratan de resolverse numéricamente para un rectificado intermitente con aplicación de líquido refrigerante. Nuestro grupo, en colaboración con investigadores de la Universidad Aeroespacial de Samara, Rusia, ha obtenido el modelo SV (modelo Samara-Valencia) [7], en el cual se aborda el problema de la transmisión de calor en el rectificado industrial de piezas metálicas. Este modelo desarrolla un enfoque del problema fundamentalmente analítico, de tal manera que una razonable simplificación de las hipótesis en las que se basa este modelo permiten reducir notablemente la complejidad de las ecuaciones diferenciales que rigen el proceso real. Esta simplificación permite abordar la ecuación diferencial que modela el proceso de transmisión de calor con técnicas matemáticas estándares, como las transformaciones integrales de Laplace y Fourier. De este modo, el modelo SV obtiene una solución al problema en forma de ecuación integral, que se puede abordar numéricamente de una manera mucho más sencilla que la resolución numérica directa de las ecuaciones diferenciales, y que se ha computado con éxito para ciertos casos realistas de rectificado [8]. La principal ventaja del modelo SV consiste en que consigue una solución analítica mucho más general que la ofrecida por el modelo clásico de Jaeger, pues se obtiene la dependencia explícita del tiempo para el caso de rectificado húmedo (con refrigerante) y fricción no continua. De hecho, se ha podido comprobar la compatibilidad entre ambos modelos particularizando el modelo SV a las hipótesis que sustentan el modelo clásico de Jaeger [9].

### 1.c Modelado matemático de sistemas fotovoltaicos de alta eficiencia

Otra de las áreas en las que nuestro grupo está trabajando activamente es en el estudio de estrategias para aumentar la eficiencia de los paneles solares. Se trata éste de un problema en el que se están realizando

do muchos esfuerzos en el panorama internacional. Desde el punto de vista económico, factor esencial en este campo, la apuesta actual de mayor futuro es la del desarrollo de las tecnologías de láminas delgadas fotovoltaicas. En este caso el medio activo está formado por una estructura de diferentes materiales semiconductores basados en el silicio y depositados en forma de capas delgadas de escala submicrométrica o nanométrica. La cantidad de material que se necesita para su fabricación es significativamente inferior que en otras tecnologías fotovoltaicas, lo que se traduce en unos costes mucho menores y en la posibilidad de generar dispositivos más versátiles. Sin embargo, aunque el medio activo pueda ser eficiente energéticamente como material en bloque, su reducción a láminas tan delgadas afecta a su eficiencia; esto es debido, básicamente, a que el recorrido libre medio de los fotones que iluminan la célula tras transmitirse en el medio activo se ve considerablemente disminuido debido a la delgadez de las láminas semiconductoras. Por este motivo, la eficiencia de estas células fotovoltaicas se encuentra actualmente todavía por debajo de las derivadas de otras tecnologías fotovoltaicas. Sin embargo, la distancia se va reduciendo [10,11]. Una de las razones de este rápido avance se debe a la introducción de estrategias innovadoras que incorporan las últimas tecnologías en el campo de la fotónica. La estrategia fundamental consiste en la integración de estructuras fotónicas en el dispositivo que aumenten el atrapado de la luz en el medio activo de la célula fotovoltaica. En la actualidad, las láminas delgadas fotovoltaicas ya incluyen recubrimientos transparentes de capas dieléctricas diseñadas para minimizar las reflexiones (láminas antirreflejantes) y aumentar la transmisión hacia el medio activo. Sin embargo, esta tecnología óptica posee ya más de setenta años y no aprovecha las inmensas posibilidades de los dispositivos fotónicos actuales. Dispositivos ópticos basados en sofisticadas micro y nanoestructuras dieléctricas, como los denominados cristales fotónicos, o metal-dieléctricas, que permiten el guiado óptico a escala nanométrica mediante los denominados plasmones superficiales, han sido desarrollados en los últimos veinte años ofreciendo nuevas posibilidades de control de la luz que todavía se están explorando. En la actualidad, la comunidad óptica y fotónica internacional ha tomado conciencia de este enorme potencial y está reaccionando rápidamente para dar respuesta a una cuestión fundamental: ¿hasta dónde se puede mejorar la eficiencia energética de las células fotovoltaicas mediante el apropiado diseño de micro o nano-estructuras de cristal fotónico o plasmónicas? Un nuevo campo, denominado “*Optics*

*for Energy*” ha sido puesto en marcha por las más importantes sociedades ópticas mundiales para afrontar, entre otros, este nuevo reto. Para predecir el comportamiento de las celdas solares en términos del atrapado de la luz, deben resolverse el conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales acopladas, las ecuaciones de Maxwell, en las diferentes capas que conforman la celda fotovoltaica. Esto se consigue por medio de diferentes aproximaciones numéricas como son: el método de Diferencias Finitas en Dominios Temporales (FDTD), el Método de Elementos Finitos (FEM) o con la ayuda de métodos semi-analíticos como el Método Diferencial, el Método de Coordenadas o el Método Riguroso de Análisis de Ondas Acopladas (RCWA). Actualmente existen ya propuestas de modelado matemático de estas ecuaciones en dispositivos ópticos de cristal fotónico y plasmónico utilizando estos esquemas numéricos cuyo objetivo es la optimización del atrapado de la energía de la luz incidente en las zonas semiconductoras activas más eficientes para la generación de la corriente fotovoltaica. Así se ha demostrado numéricamente que una estructura de cristal fotónico en una dimensión excitada por una onda plana en una célula solar de lámina delgada aumenta su eficiencia energética [12].

#### **1.d Modelado matemático del metabolismo de microorganismos productores de biocombustibles**

Los avances actuales en la Biología de Sistemas, que trata de estudiar la lógica y los distintos mecanismos de un sistema biológico, han propiciado el desarrollo de una nueva disciplina llamada Biología Sintética (BS) que se centra en el diseño y construcción de sistemas genéticos artificiales, capaces de desarrollar una funcionalidad específica al ser insertados dentro de un sistema vivo [13-21]. Con el desarrollo de la BS, ha aparecido una nueva generación de diseñadores, biotecnólogos y bioingenieros, que plantea el desarrollo de circuitos genéticos biológicos complejos con un gran nivel de integración. El avance de esta disciplina científica pasa por establecer un marco computacional y conceptual donde, gracias a una metodología abstracta y sistemática, sea posible desarrollar sistemas bacterianos artificiales modulares. Nuestro grupo viene trabajando en el modelado matemático del metabolismo de los microorganismos sobre los que se van a desarrollar las ulteriores aplicaciones. En estos momentos, el grupo ha desarrollado diferentes redes metabólicas a escala genómica de microorganismos

fotosintéticos con aplicaciones bioenergéticas (en el marco de su participación tanto en proyectos europeos del VI y VII Programa Marco de la Comisión Europea como en proyectos nacionales) y afronta, entre otros, el reto de analizar desde el punto de vista abstracto las propiedades topológicas y dinámicas de dichas redes metabólicas, buscando los criterios que permitan definir módulos estandarizables entre las diferentes rutas metabólicas. Además, en la actualidad, se está haciendo un gran esfuerzo en el desarrollo de herramientas informáticas que faciliten el diseño de estos sistemas biológicos. En el marco conceptual de la BS, cualquier sistema biológico puede ser visto como una combinación compleja de elementos funcionales, combinados en dispositivos y sistemas de manera similar a la de otros sistemas artificiales creados por el hombre y, por consiguiente, puede ser deconstruido en un número limitado de componentes y reconstruido formando configuraciones dotadas de propiedades y posibilidades enteramente nuevas. Por tanto, la BS es un nuevo campo de investigación que combina ciencia e ingeniería. En definitiva, su objetivo es el diseño y construcción de novedosos sistemas biológicos para un fin concreto. Nuestro grupo está interesado en su utilización en el campo de la generación de biocombustibles [22-26].

## 2. el experimento europeo *GeoCool* y el nacimiento de la spin-off *Energesis*

En lo que sigue, y con el ánimo de ofrecer una visión general de la situación de la energía geotérmica en Europa, y más concretamente en España, así como del estado actual de esta tecnología, es interesante empezar definiendo la energía geotérmica: la geotermia es la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie terrestre. Así, ya se acepta a nivel europeo como geotermia el aprovechamiento del terreno como un recurso térmico. Estas líneas van a tratar de desvelar cómo la geotermia, una de las fuentes de energía renovable menos conocidas, posee al mismo tiempo un importante potencial para la generación de energía térmica y eléctrica.

Estas posibilidades no se limitan, como habitualmente se cree, a zonas con condiciones geológicas favorables. También existen usos y tecnologías que permiten utilizar recursos geotérmicos a temperaturas sustancialmente inferiores a las que se necesitaban años atrás, y que se hallan presentes en amplias zonas del planeta.

Partiendo de esta base es importante diferenciar dos grandes sectores de aplicación y tecnológicos:

- La geotermia para producción de electricidad en yacimientos de alta temperatura (superiores a los 100-150°C), propia de zonas con unas determinadas características geológicas.
- Los usos térmicos en los sectores industrial, servicios y residencial, para temperaturas por debajo de los 100°C ya sea en la modalidad de uso directo (calentamiento de distrito, balnearios, acuicultura, etc.) o a través de bomba de calor geotérmica (calefacción y refrigeración) para temperaturas del terreno muy bajas (por debajo de los 25°C). Esta vertiente se suele clasificar como energía geotérmica somera, de muy baja entalpía o geotermia mediante bomba de calor. En este sentido, la bomba de calor constituye el elemento que nos permite hacer un uso eficiente de las temperaturas del terreno. A día de hoy, se trata de una tecnología que se encuentra en auge en España, emergente y de claro interés industrial.

### 2.a Principios básicos

La bomba de calor es uno de los elementos fundamentales para la climatización en la edificación mediante energía geotérmica. Ésta es un dispositivo bien conocido que permite refrigerar espacios cuando la temperatura exterior es cálida y calentar espacios cuando la temperatura exterior es fría.

En resumen, termodinámicamente podríamos decir que la bomba de calor establece un flujo de calor de un cierto foco frío hacia uno caliente gracias a un consumo de trabajo llevado a cabo en un compresor. De esta forma, cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas entre focos, peor será el rendimiento energético, generalmente denominado COP (*Coefficient of Performance*), de la máquina.

En el caso concreto de una bomba de calor aplicada a la geotermia, se busca establecer el flujo de calor entre el subsuelo y el lugar a acondicionar según interese. Dicho subsuelo y el lugar a acondicionar juegan el papel de foco frío o caliente, independientemente de que se opere en condiciones de verano (refrigeración) o invierno (calefacción).

Por ejemplo, en Valencia, España, la temperatura interior deseable en verano en un edificio es de unos

24°C. Si imaginamos que queremos refrigerar una habitación a esta temperatura, se pueden presentar dos escenarios energéticamente muy diferentes: el sistema tradicional, que elimina el calor excedente al aire que rodea el edificio, el cual puede encontrarse, por ejemplo, a 35 grados y el caso geotérmico, en el que el calor excedente se trasmite al subsuelo, que en Valencia está a unos 20 grados. El diferente salto térmico que la bomba de calor debe vencer en ambos casos es la razón última por la que el sistema geotérmico requiere menor aporte eléctrico para climatizar un edificio. Es decir, como el salto de temperaturas que la bomba de calor geotérmica debe vencer es potencialmente mucho menor, su rendimiento (COP) será notablemente mayor. A pesar de ello, la bomba de calor geotérmica utiliza elementos tecnológicamente muy parecidos a los usados en un sistema de acondicionamiento convencional.

El verdadero reto tecnológico de esta tecnología renovable consiste en limitar el fenómeno de la afectación térmica del terreno. Esto consiste en minimizar la modificación de las temperaturas del suelo de manera limitada y controlada a fin de no penalizar el rendimiento del sistema. Esto implica la elaboración de un cuidadoso diseño del conjunto de la instalación que habrá de tener en cuenta el conjunto de los flujos energéticos del edificio y las características térmicas del terreno, entre otros. En definitiva, se dice que una bomba de calor geotérmica es una bomba de calor que utiliza el suelo para funcionar en condiciones de temperatura más favorables comparadas con el aire, permitiendo un ahorro sustancial de energía (alrededor de un 50% para un clima como el de Valencia), siempre que el sistema haya sido diseñado correctamente para que el suelo absorba o ceda el calor adecuadamente.

En definitiva, la geotermia es una energía limpia y renovable que aprovecha el calor del sol almacenado por el suelo para obtener calefacción, refrigeración y agua caliente de forma ecológica. La climatización geotérmica aprovecha que la temperatura del suelo es estable durante todo el año para ceder o extraer calor de la tierra, según queramos enfriar o calentar un edificio, a través de un circuito cerrado de tuberías enterradas en el suelo por las que circula agua.

En la siguiente figura se presenta un esquema de funcionamiento básico del sistema de climatización geotérmico de un edificio y a continuación se describen, de forma sucinta, tanto los elementos principales que constituyen un sistema geotérmico como las ventajas

que esta tecnología presenta frente a un sistema de climatización de edificios tradicional.



#### *Elementos de un equipo geotérmico*

- Bomba de calor geotérmica. Es un aparato eléctrico que permite que el intercambio de calor con el suelo se realice. Dispone de modo frío para el verano y modo calor para el invierno.
- Tuberías plásticas enterradas en el suelo por las que circula agua.
- Bomba hidráulica, que bombea el agua que fluye por las tuberías.

#### *Ventajas de la energía geotérmica*

##### *Económicas*

- 50% de ahorro medio en la factura de la electricidad (en las condiciones climáticas valencianas)
- Costes de mantenimiento mínimos frente a los sistemas tradicionales
- Aumento de la vida útil del equipo de climatización
- Energía renovable (en España está subvencionada por organismos oficiales)

##### *Para la salud*

- Eliminación del riesgo de transmisión de legionelosis (este tipo de instalaciones no requiere torres de refrigeración para su funcionamiento. De esta

manera se eliminan los problemas asociados a ellas)

#### *Medioambientales*

- Uso de la energía del sol almacenada por el suelo
- Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en torno al 50% en las condiciones valencianas
- Sistema silencioso (con la alternativa geotérmica se eliminan fuentes de ruido como las asociadas a las unidades exteriores convencionales de climatización. De esta manera, la opción geotérmica reduce la contaminación acústica del medio)

#### *Arquitectónicas*

- Eliminación de elementos externos visibles en fachadas y cubiertas
- Mejora de la estética del edificio
- Ahorro de espacio en azoteas y terrazas

#### *Otras ventajas*

- Calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria con un solo sistema
- Funciona las 24 horas del día, los 365 días del año, independientemente de las condiciones climatológicas
- Perfectamente compatible con instalaciones de otras energías renovables

¿Dónde se puede instalar un sistema geotérmico?

En cualquier edificación que requiera calefacción y/o refrigeración, así como agua caliente: hospitales, edificios de oficinas, colegios, hoteles, edificios públicos, bloques de viviendas, viviendas unifamiliares, etc. Además, la geotermia se puede implantar tanto en edificios ya construidos como de nueva construcción.

## **2.b Breve historia de la investigación (experimento europeo *GeoCool*) y transferencia social**

La geotermia de baja temperatura es una tecnología que se utilizaba desde hace décadas en países como

EE.UU., Alemania y Suecia para proveer exclusivamente de calefacción a los edificios. El objetivo del proyecto *GeoCool* consistía en demostrar que esta tecnología es igual de eficiente a la hora de aportar refrigeración a los edificios, es decir, para climatizarlos (calefacción y refrigeración).

El proyecto *GeoCool* (*Geothermal Heat Pump for Cooling and Heating Along European Coastal Areas – Bomba de Calor Geotérmica para Refrigeración y Calefacción en Zonas Costeras Europeas*) consistió en la implantación de una instalación geotérmica piloto en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la UPV.

Esta instalación, con seis perforaciones de 50 metros de profundidad, permite climatizar doce despachos y un aula de esta escuela universitaria. La investigación fue liderada por la UPV y subvencionada por la Unión Europea.

*GeoCool* es una instalación singular y única en el mundo porque incluye el sistema tradicional de climatización y el sistema geotérmico. Un sofisticado sistema de monitorización permite comparar rigurosamente ambos sistemas. La conclusión final es que la geotermia conlleva ahorros energéticos en torno al 50%.

Aunque la investigación se desarrolló entre febrero de 2003 y febrero de 2006, *GeoCool* sigue funcionando y se siguen tomando mediciones para mejorar el sistema geotérmico.

De los resultados obtenidos del estudio de esta instalación geotérmica, se creó en 2004 la empresa *Energisis*, especializada en el diseño, implantación y gestión de este tipo de instalaciones. Esta empresa nacida de la UPV es un ejemplo real de cómo la colaboración universidad-empresa es fundamental para que la sociedad se beneficie de los conocimientos e investigaciones realizados en los centros universitarios.

En las figuras que presentamos a continuación se ilustran algunos de los elementos que caracterizan el experimento, así como los principales resultados de la investigación.

*Perforaciones:*

## Sala de máquinas y bomba de calor



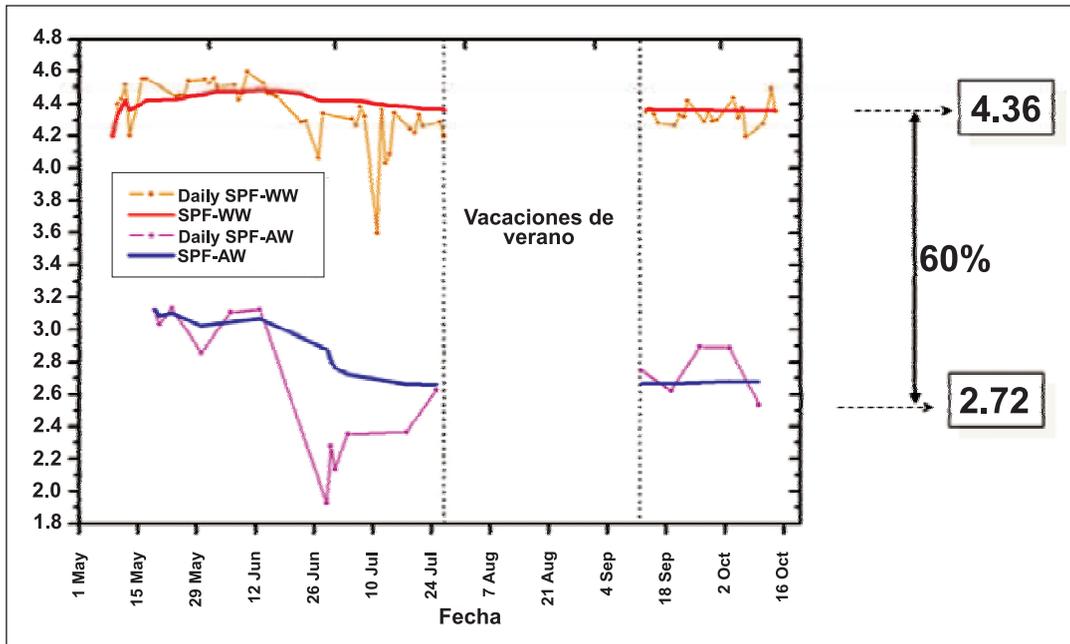
Tuberías enterradas



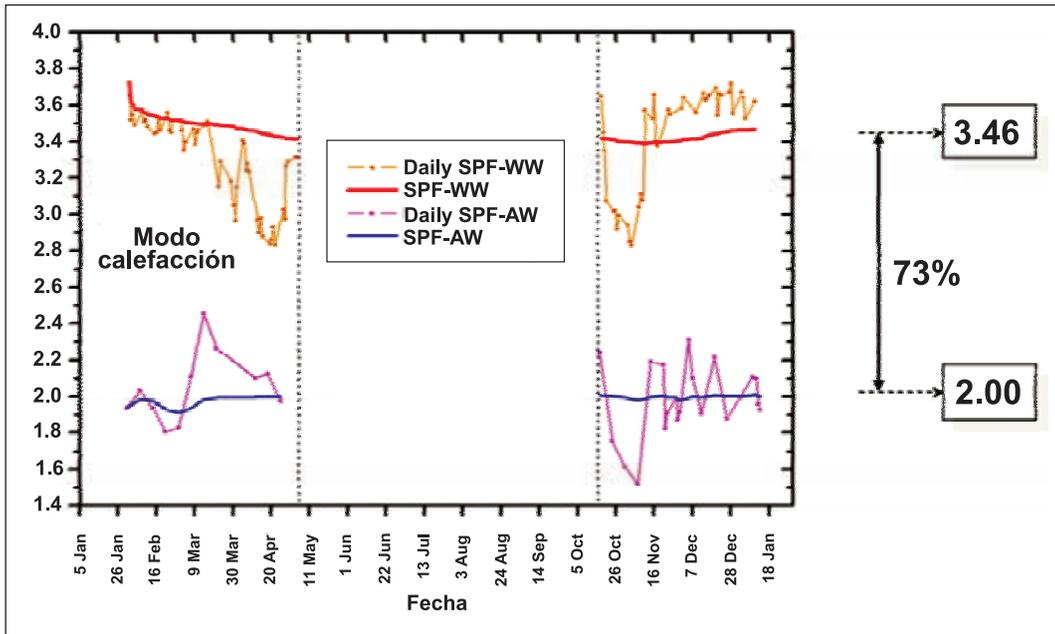
Colectores geotérmicos en el jardín



Resultados del experimento GeoCool (modo refrigeración)



Resultados del experimento GeoCool (modo calefacción)



**Reflexiones finales y conclusiones**

En este trabajo se presentan diversas aplicaciones del modelado matemático a problemas de interés en el campo de la Energía, desarrolladas en el seno del Grupo de Modelización Interdisciplinar, InterTech.

InterTech se creó hace más de una década como resultado de la colaboración de un grupo de matemáticos, físicos e ingenieros de la Universidad Politécnica de Valencia y de la Universidad de Valencia interesados en potenciar nuevas líneas de colaboración en campos que generalmente permanecían aislados. El objetivo principal de este grupo interdisciplinar es generar sinergias en varias áreas prioritarias de investigación.

Actualmente InterTech está formado por más de 30 investigadores adscritos mayoritariamente al Instituto Universitario de Matemática Pura de la UPV pero también cuenta con profesionales de la Universitat de València y de la Universidad Católica de Valencia (UCV), con un perfil muy diverso que va desde matemáticos a físicos, pasando por ingenieros, biólogos y químicos.

La peculiaridad de este grupo reside en que su filosofía de trabajo viene definida por la modelización avanzada de sistemas de interés energético con una fuerte componente de física y matemáticas. Los investigadores

de InterTech se centran principalmente en la resolución de problemas multidisciplinares cuya simulación numérica requiera una computación exigente de altas prestaciones y en problemas cuya resolución permita el desarrollo de aplicaciones tecnológicas con potencial de transferencia empresarial.

Entre estos destacan los temas de investigación expuestos en este artículo, que van desde el estudio de los sistemas de climatización geotérmica de edificios, la transmisión de calor en el proceso de rectificado industrial, las soluciones fotónicas para aumentar la eficiencia de los paneles solares o el modelado del metabolismo de sistemas microbianos para la producción de biocombustibles de última generación.

Por último, se ha presentado un ejemplo de transferencia tecnológica a la sociedad, impulsado desde el grupo de investigación y materializado en la creación de una spin-off: Energesis Ingeniería, una empresa que no sólo está implantando sistemas geotérmicos de climatización en edificaciones, sino que apuesta por una fuerte presencia del I+D entre sus actividades centrándose, fundamentalmente, en dos campos: el ahorro energético en la edificación y el uso del suelo como foco de intercambio térmico. Ambos campos requieren el despliegue de sofisticados modelos de simulación numérica, tanto de los intercambios energéticos en edificios como de la transmisión de calor en suelos.

## Bibliografía

- [1] G. Hellström. Thermal Analysis of Duct Storage Systems, Dept. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden (1991).
- [2] W. Austin. Development of an in situ system for measuring ground thermal properties, M.Sc. Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK, USA (1998).
- [3] S. Malkin. Grinding technology: theory and application of machining with abrasives, Ellis Horwood Ltd. and John Wiley and Sons (1989).
- [4] A. S. Lavine. An exact solution for surface temperature in down grinding, *Int. J. Heat Mass Transfer* **43** (2000) 4447.
- [5] A. S. Lavine. Thermal aspects of grinding: the effects of heat generation at the shear planes, *Annals of CIRP* **40** (1991) 343.
- [6] Jaeger JC. (1942) Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts. *Proc R Soc NSW* 76:204.
- [7] D.L. Skuratov, Yu.L. Ratis, I.A. Selezneva, J. Pérez, P. Fernández de Córdoba and J.F. Urchueguía. Mathematical modelling and analytical solution for workpiece temperature in grinding, *Applied Mathematical Modelling* 31, Issue 6, June 2007, 1039.
- [8] J. Pérez, S. Hoyas, D. Skuratov, y. Ratis, I. Selezneva, P. Fernández de Córdoba, J. Urchueguía. Heat transfer analysis of intermittent grinding processes, *Int J Heat Mass Transf.* **51** (2008) 4132.
- [9] J. L. González-Santander, J. Pérez, P. Fernández de Córdoba, J. M. Isidro. An analysis of the temperature field of the workpiece in dry continuous grinding. *J Eng Math*, DOI 10.1007/s10665-009-9335-6.
- [10] S. Grama. A Survey of Thin-Film Solar Photovoltaic Industry & Technologies. Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [11] M. A. Green. Consolidation of thin-film photovoltaic technology: the coming decade of opportunity. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **14**, no. 5 (2006): 383-392.
- [12] Aimi Abass, Honghui Shen, Peter Bienstman, Bjorn Maes. Increasing polymer solar cell efficiency with triangular silver grating. *EPFL-PROC-148778* (2010).
- [13] D.K. Ro, E.M. Paradise, M. Ouellet, K.J. Fisher, K.L. Newman, J.M. Ndungu, K.A. Ho, R.A. Eachus, T.S. Ham, J. Kirby, M.C. Chang, S.T. Withers, Y. Shiba, R. Sarpong, and J.D. Keasling. Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast. *Nature* 440; April 2006.
- [14] R Weiss. From bacteria to stem cells. Proceedings of the annual conference in functional genomics. Goteborg, Sweden, 2007.
- [15] J. Aleksic, F. Bizzari, Y. Cai, B. Davidson, K. de Mora, S. Ivakhno, S.L. Seshasayee, J. Nicholson, J. Wilson, A. Elfick, C. French, L. Kozma Bognar, H. Ma, and A. Millar. Development of a novel biosensor for the detection of arsenic in drinking water. *IET Synthetic Biology* 1 pp 87, 2007.
- [16] L.L. Looger, M.A. Dwyer, J.J. Smith, H.W. Hellinga. Computational design of receptor and sensor proteins with novel functions. *Nature* **423** (2003) 185.
- [17] USDOE. 2005. Genomics: GTL Roadmap: Systems biology for energy and environment. DOE/SC 0090. Available at <http://genomicsgtl.energy.gov> (verified 14 Aug. 2007). USDOE, Office of Science, Washington, DC.
- [18] USDOE. 2006. Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: A joint research agenda. DOE/SC 0095. <http://genomicsgtl.energy.gov/biofuels/b2bworkshop.shtml> (verified 14 Aug. 2007). USDOE Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington DC.
- [19] M.B. Elowitz, S. Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, *Nature* **403** (2000) 335-338.
- [20] T.S. Gardner, C.R. Cantor, J.J. Collins. Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli*. *Nature* **403** (2000) 339-342.
- [21] A. Becskei, L Serrano. Engineering stability in gene networks by autoregulation, *Nature* 405 (2000) 590-593.
- [22] E. Navarro, A. Montagud, P. Fernández de Córdoba y J.F. Urchueguía. Metabolic flux analysis of the hydrogen production potential in *Synechocystis* sp. PCC6803". *International Journal of Hydrogen Energy* **34** (2009) 8828.
- [23] A. Montagud, E. Navarro, P. Fernández de Córdoba, J. F. Urchueguía y K. R. Patil. "Reconstruction and analysis of genome-scale metabolic model of a photosynthetic bacterium". *BMC Systems Biology* **4** (2010) 156.
- [24] A. Montagud, A. Zelezniak, E. Navarro, P. Fernández de Córdoba, J. F. Urchueguía y K. R. Patil. Flux Coupling and Transcriptional Regulation within Genome-Scale Metabolic Model of Photosynthetic Bacterium *Synechocystis* sp. PCC6803. *Biotechnology Journal* **6** (2011) 1.
- [25] R. Reyes, J. Garrido, R.A. Jaime, V. Córdova, J. Triana, L. Villar, J.C. Castro, P. Fernández de Córdoba, J.F. Urchueguía, E. Navarro y A. Montagud. Desarrollo de una plataforma computacional para el modelado metabólico de microorganismos. *Nereis. Revista Iberoamericana de Métodos, Modelización y Simulación Interdisciplinar* **3** (2011) 25.
- [26] C. Vilanova, A. Hueso, C. Palanca, G. Marco, M. Pitarch, E. Otero, J. Crespo, J. Szablowski, S. Rivera, L. Domínguez-Escribá, E. Navarro, A. Montagud, P. Fernández de Córdoba, A. González, J. Ariño, A. Moya, J. Urchueguía y M. Porcar. Aequorin-expressing yeast emits light under electric control. *Journal of Biotechnology* **152** (2011) 93.
- [27] T. V. Bandos, A. Montero, E. Fernández, J.L.G. Santander, J.M. Isidro, J. Pérez, P. Fernández de Córdoba y J. Urchueguía. Finite Line-Source Model for Borehole Heat Exchangers: Effect of Vertical Temperature Variations. *Geothermics* **38** (2009) 263.
- [28] T. V. Bandos, A. Montero, P. Fernández de Córdoba y J. Urchueguía. Improving Parameter Estimates Obtained from Thermal Response Tests: Effect of Ambient Air Temperature Variations. *Geothermics* **40** (2011) 136.
- [29] T. Bandos, A. Montero, P. Fernández de Córdoba y J.F. Urchueguía. Use of Thermal Conductivity from Thermal Response Test for Estimating Static Temperatures in Rock and Stratified Soil near Line Source of Heat. *HVAC and Research* **17** (6) (2011) 1030.
- [30] J.L.G. Santander, P. Castañeda, J.M. Isidro y P. Fernández de Córdoba. Calculation of some integrals arising in heat transfer in *Geothermics*. *Mathematical Problems in Engineering* (2010) ID 784794.

Recibido: Enero 13 de 2012.

Aceptado para su publicación: Marzo 2 de 2012.

## EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE PLAGUICIDAS UTILIZADOS EN SALUD PÚBLICA

Luis Alberto Chávez Almazán\*, Gustavo Pérez Rendón\*, Jesús Antonio Díaz Ortiz\*,  
Mario Alberto Alarcón Romero\*, saúl López silva\*\*

### Resumen

**Chávez Almazán L. A.; G. Pérez Rendón; J.A. Díaz Ortiz; M. A. Alarcón Romero; s. López silva:** Evaluación de los parámetros fisicoquímicos de plaguicidas utilizados en salud pública. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (138): 105-113, 2012. ISSN 0370-3908.

Se cuantificó el ingrediente activo de los productos Ficam W, Aqua Reslin Super y T.M. Fos 1%G por métodos cromatográficos y se verificó el cumplimiento de las especificaciones de la Organización Mundial de la Salud respecto a las propiedades físicas. Adicionalmente, se comparó el contenido de temefos entre distintas marcas comerciales de larvicidas granulados. Las concentraciones de bendiocarb, s-bioaletrina y temefos cumplieron los requisitos establecidos. Se obtuvieron resultados fuera de especificaciones en humectabilidad, espuma persistente y prueba de tamiz. Uno de los larvicidas comparados tuvo menor concentración que los límites de referencia. La evaluación de la calidad de los insecticidas es un elemento primordial antes de su aplicación.

**Palabras clave:** Control de calidad, insecticidas, enfermedades transmitidas por vector, especificaciones de plaguicidas.

### ABSTRACT

The active ingredient was quantified in pesticide products such as Ficam W, Aqua Reslin Super and T.M. Fos 1%G by chromatographic methods and physical properties were determined to verify compliance of World Health Organization (WHO) specifications. Additionally, the temephos content was compared with different trademarks of granular larvicides. Bendiocarb, s-bioallethrin and temephos concentrations met the requirement. The results of physical properties were outside of WHO specifications for testing wettability, persistent foam and sieve. In the granular larvicides compared,

\* Laboratorio Estatal de Salud Pública "Dr. Galo Soberón y Parra", Blvd. Vicente Gro. Esq. Juan R. Escudero S/N, Cd. Renacimiento, C.P. 39715, Acapulco, Guerrero, México. Correo electrónico: chavez\_79@hotmail.com Tel/Fax: 52+ (744) 4418502/4414090, ext. 24

\*\* Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Guerrero, Av. Solidaridad S/N, Col. Hornos Insurgentes, C.P. 39300, Acapulco, Guerrero, México.

only one of these had a temefos concentration below the reference limit. The quality evaluation of insecticides before their application is fundamental in vector control programs.

**Keywords:** Quality control, insecticides, vector-borne diseases, pesticide specifications.

## 1. Introducción

El control químico constituye un componente esencial en las estrategias integrales de prevención y control de las enfermedades transmitidas por vectores –ETVs– (WHO, 2004). El impacto de los insecticidas sobre las poblaciones blanco depende de varios factores, entre los que se encuentran los siguientes: técnicos (coberturas, periodicidad de aplicación, calibración del equipo, tamaño de gota, etc), biológicos (susceptibilidad y/o resistencia del vector), de calidad del producto y la aceptación de la población. Respecto a la calidad de los insecticidas, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) a través del Programa de Evaluación de Plaguicidas (WHOPES, por sus siglas en inglés) y de grupos de expertos de la Reunión Conjunta sobre Especificaciones de Plaguicidas (FAO/OMS JMPS) han establecido especificaciones para las propiedades físicas y químicas que deben cumplir los productos empleados en agricultura y salud pública, y recomiendan a los países importadores de plaguicidas la implementación de programas de control de calidad con el apoyo técnico de centros de servicios analíticos que utilicen procedimientos científicos sólidos y observen las directrices sobre buenas prácticas de laboratorio (FAO/WHO, 2006; FAO, 2006; WHO, 2005). En México no existe un programa sistemático de esta naturaleza, por lo que su implementación debe ser parte de las estrategias y líneas de acción de los programas de ETVs de las dependencias del sector salud. Año con año la compra de insecticidas representa un gasto de varios millones de pesos, y debido a que los recursos económicos pueden verse limitados en los ejercicios presupuestales de las entidades federativas, es necesario que las instituciones adquieran productos que garanticen el impacto deseado dando lugar a la realización de intervenciones efectivas en el control vectorial; además, debe señalarse que la disponibilidad de plaguicidas de buena calidad es substancial para minimizar los riesgos a la salud asociados con el manejo y uso de estos químicos.

El objetivo de este trabajo es generar evidencia para la selección de insecticidas que cumplan con las especificaciones de la OMS y servir como referencia de

los métodos analíticos con los que deberá probarse la calidad del producto; por último, se pretende propiciar un cambio de actitud en los gobiernos estatales y/o nacionales, haciendo énfasis en que la toma de decisiones respecto al uso de insecticidas para el control de vectores debe estar apoyada en evaluaciones como la planteada en este trabajo.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Muestras

Los insecticidas utilizados fueron T.M. Fos 1%G (Temefos 10 g/kg, Granulado, *Agromundo S.A. de C.V.*, México), Ficam W (Bendiocarb 760 g/kg, Polvo humectable) y Aqua Reslin Super (Permetrina -108.7 g/L- y S-bioaletrina -1.5 g/L-, Emulsión de aceite en agua) de *Bayer Environmental Science S.A.*, Francia. Se aplicaron los procedimientos para la recolección de muestras planteados por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 1999), tomando muestras de 500 g de Ficam W, así como 2 kg de T.M. Fos 1%G y 500 mL de Aqua Reslin Super por cada lote existente de producto. También se tomaron muestras únicas de formulaciones granuladas de temefos al 1% (10 g/kg) de las compañías *Agromundo*, *Química Lucava*, *Quimix* y *BASF Mexicana*.

### 2.2. Reactivos

Para el análisis cromatográfico se utilizaron acetato de etilo, acetona, acetonitrilo, agua, hexano, metanol (grado HPLC, *JT Baker*, México), así como estándares analíticos de bendiocarb (99.5%), permetrina (98.0%), temefos (97.5%) y s-bioaletrina (98.0%) suministrados por *Sigma Aldrich* (St. Louis, MO, EE.UU.). En el análisis de propiedades físicas se utilizó agua destilada, cloruro de calcio anhidro y cloruro de magnesio hexahidratado (*HYCEL*, México) para preparar agua con una dureza de 342 y 34.2 mg/L de carbonato de calcio.

### 2.3. equipo

El contenido de ingrediente activo fue determinado por cromatografía de líquidos de alta resolución con un de-

teor de ultravioleta-visible (Modelo Series 200, *Perkin Elmer*, EE.UU.) a una longitud de onda de 254 nm y por cromatografía de gases con detección por ionización de flama (Modelo 6890N, *Agilent Technologies*, EE.UU.), utilizando las columnas Econosphere Silica 5 $\mu$  (*Grace Davison Discovery Sciences*, EE.UU.), Zorbax Eclipse XDB-C18 y HP-5MS (*Agilent Technologies*, EE.UU.). Para el análisis de propiedades físicas se utilizaron los siguientes equipos: balanza analítica, circulador de inmersión, agitador orbital, bomba de vacío y mezclador tipo vórtex.

## 2.4. Confirmación del desempeño de los métodos

Se implementaron los métodos de análisis de ingrediente activo publicados por el *Collaborative International Pesticides Analytical Council –CIPAC–*; al tratarse de métodos normalizados, nuestro laboratorio realizó la confirmación de su desempeño o una validación interna parcial, evaluando los parámetros de precisión, linealidad, exactitud y sensibilidad en todos los compuestos, y estableciendo los límites de cuantificación y de detección solamente para el temefos y s-bioaletrina. Los procedimientos fueron realizados de acuerdo a las guías internacionales de validación de métodos (APVMA, 2004; CIPAC, 2009a; EURACHEM, 1998) y se resumen a continuación:

**Precisión:** Se analizaron de 5 a 7 veces soluciones de estándar con una concentración media o normal, se calculó el coeficiente de variación y se elaboraron las gráficas correspondientes.

**Linealidad:** Se inyectaron por duplicado en los sistemas cromatográficos distintos niveles de concentración de los ingredientes activos; las diluciones se hicieron a partir de estándares analíticos y procurando que dichos niveles incluyeran el valor nominal del insecticida en la formulación, es decir, la concentración informada por el fabricante en la etiqueta del producto (D.W. Tholen, et al. 2003; J. S. Jhang, et al. 2004). Se calcularon la pendiente, intercepto, coeficientes de correlación y determinación, se graficó el área del pico obtenido en el cromatograma *versus* la concentración expresada en g/kg (gramos de ingrediente activo por kilogramo de producto) o g/L (gramos de ingrediente activo por litro de producto) y se realizó un análisis de residuales.

**Exactitud:** De los resultados del experimento de linealidad, se calcularon el porcentaje de recuperación y el sesgo para evaluar la exactitud de los métodos, tomando en cuenta las concentraciones obtenidas y las

esperadas del nivel más próximo al valor nominal del insecticida en la formulación, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{\text{Concentración obtenida}}{\text{Concentración esperada}} \times 100$$

$$\text{Sesgo} = \text{Concentración esperada} - \text{Concentración obtenida}$$

**Límites de cuantificación y de detección:** Se inyectaron soluciones de muestra con bajas concentraciones, y el nivel mínimo que el sistema pudo cuantificar con una precisión aceptable (CV no mayor a 5%) fue el que se estableció como límite de cuantificación; para el límite de detección se tomó la concentración que produjera una señal no mayor a tres veces el nivel del ruido de fondo del instrumento.

**Sensibilidad:** Este parámetro fue determinado por el valor de la pendiente calculado a partir de los datos del experimento de linealidad.

## 2.5. Análisis de ingrediente activo

Se emplearon las técnicas para la identificación y cuantificación de temefos, bendiocarb, s-bioaletrina y permetrina (CIPAC, 1985, 1988, 2006, 2009b) a los lotes de productos muestreados; los resultados obtenidos en g/kg o g/L se compararon frente a los valores nominales del ingrediente activo y las especificaciones de la OMS para estos insecticidas. Adicionalmente, se realizó una comparación respecto al contenido de temefos de larvicidas granulados de los fabricantes *Agromundo*, *Química Lucava*, *Quimix* y *BASF Mexicana*, de los cuales se recolectó una muestra única sin la aplicación de un muestreo sistemático.

## 2.6. Análisis de propiedades físicas

Estas pruebas se realizaron en función del tipo de formulación de los productos, por lo que se determinó el pH y espuma persistente al Ficam W y Aqua Reslin Super, humectabilidad y suspensibilidad al Ficam W, densidad aparente y tamiz de partículas se realizaron al T.M. Fos 1%G; se utilizaron las técnicas descritas por el CIPAC (CIPAC, 1994).

## 2.7. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de los experimentos fueron procesados en hojas de cálculo del programa Excel; las

gráficas de linealidad, residuales y precisión se realizaron con el paquete estadístico Analyse-it, versión 2.20.

### 3. Resultados

#### 3.1. Desempeño de los métodos

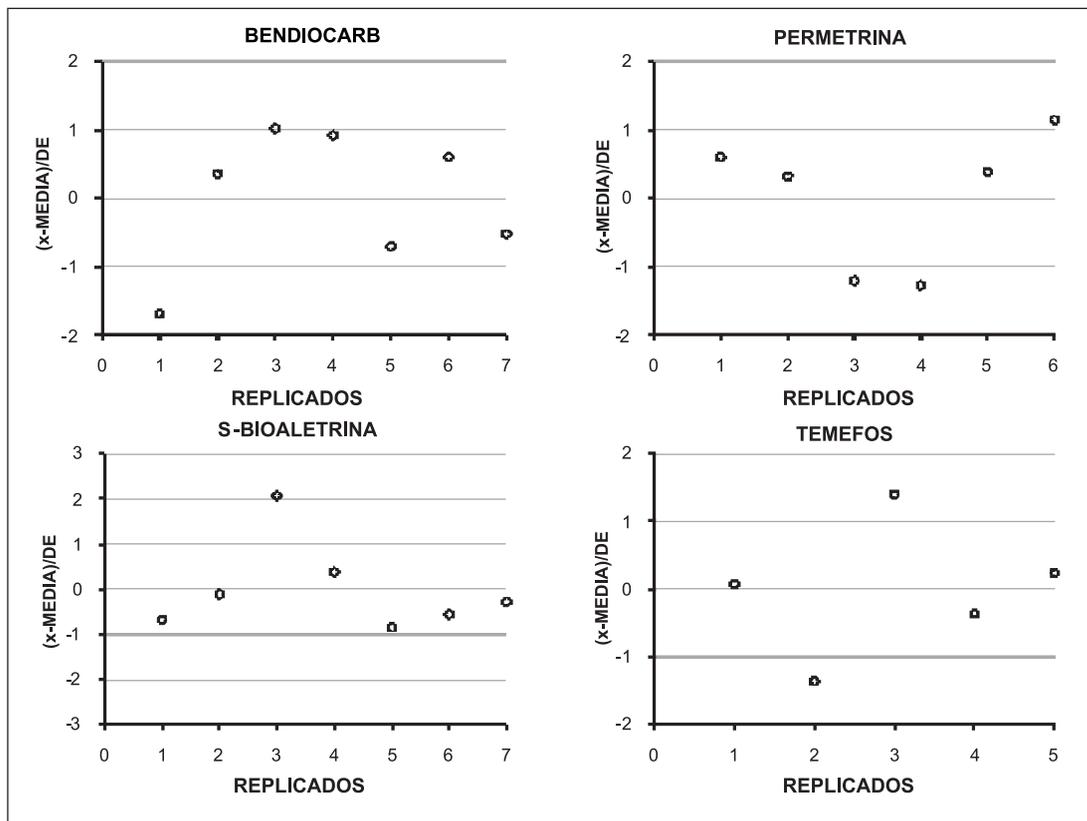
En la evaluación de la precisión, los coeficientes de variación de todos los analitos fueron menores a los criterios de aceptación (Bendiocarb: 0.5%, Permetrina: 1.0%; Temefos: 4.1% y S-bioaletrina: 1.9%) (Tabla 1); además, existió una distribución aleatoria de los valores en todos los analitos, lo cual nos indicó la ausencia de errores sistemáticos en estas mediciones (Figura 1). En el análisis gráfico del experimento de linealidad, existió una adecuada respuesta y los residuales se encontraron dispersos aleatoriamente (Figura 2). En los intervalos lineales mostrados en la Tabla 2, se obtuvieron coeficientes de correlación (r) en un rango de 0.996-0.999 y los de determinación (r<sup>2</sup>) se encontraron entre 0.993-0.999. Los métodos de análisis del bendiocarb, temefos y s-bioaletrina cumplieron con los

criterios de aceptación establecidos para los porcentajes de recuperación (Tabla 3), como consecuencia, estos métodos contaron con niveles menores de sesgo o error sistemático. El límite de cuantificación para temefos fue de 1 g/kg y de 0.34 g/L para s-bioaletrina, asimismo, el límite de detección fue de 0.5 g/kg y 0.3 g/L para temefos y s-bioaletrina, respectivamente. La sensibilidad del método en microvoltios por segundo (µV/s) fue de 19301 (bendiocarb), 352109 (permetrina), 186928 (temefos) y 116309 (s-bioaletrina).

**tabla 1.** Precisión de los métodos de análisis de ingrediente activo

Ingrediente activo	CV % Obtenido	CV % Aceptable
Bendiocarb	0.5	≤2
Permetrina	1.0	
S-bioaletrina	4.1	≤10
Temefos	1.9	

Simbolo: CV%= Coeficiente de variación porcentual



**Figura 1.** Gráficas de precisión elaboradas restando el Valor Obtenido de cada medición (X) a la Media total entre la Desviación Estándar (DE) del ensayo

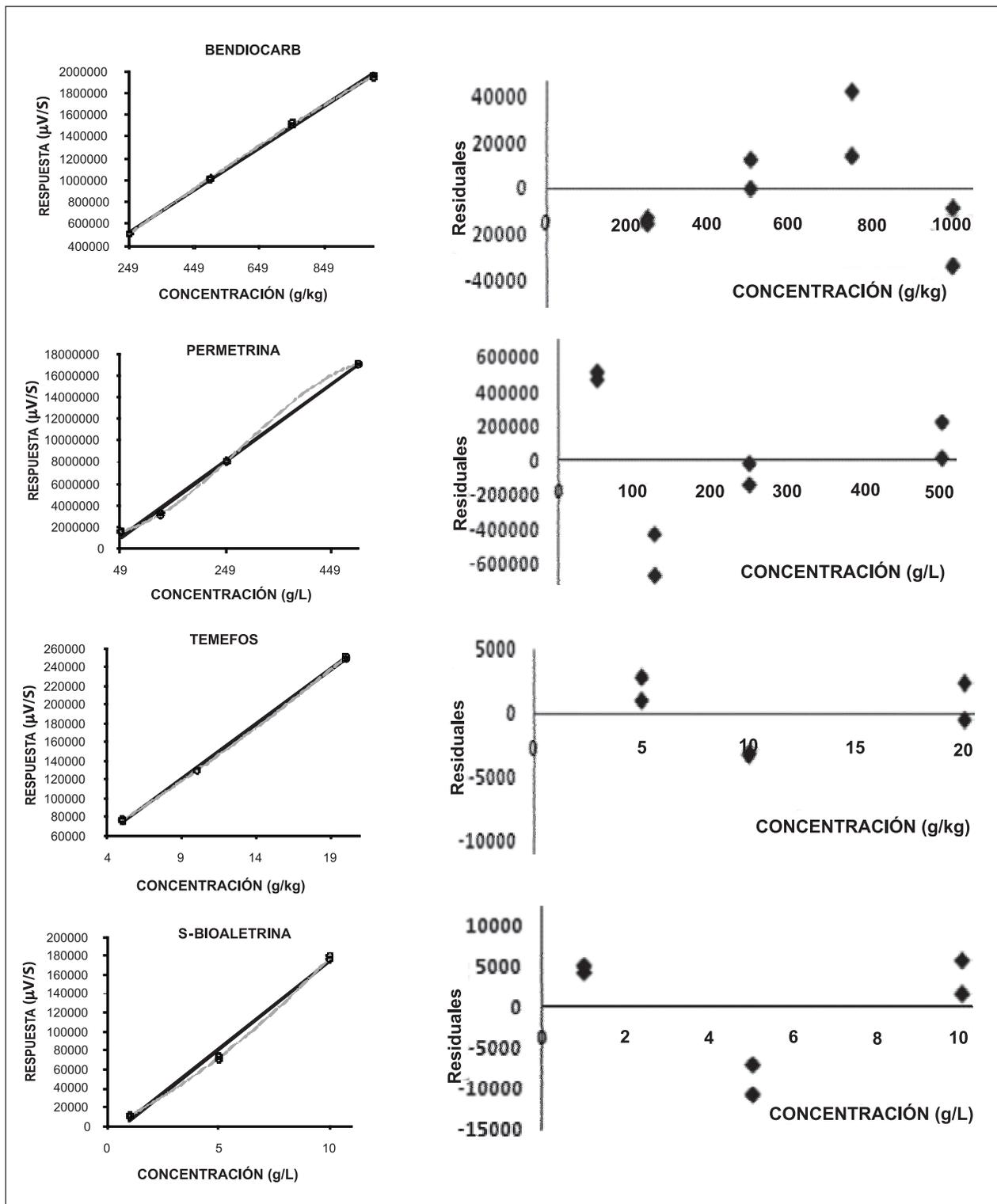


Figura 2. Gráficos de linealidad y residuales

**tabla 2.** Resumen del experimento de linealidad

Ingrediente activo	Intervalo lineal	Pendiente ( $\mu\text{V/s}$ )	Intercepto ( $\mu\text{V/s}$ )	r	r <sup>2</sup>
Bendiocarb, g/kg	250-1000	19301	41928	0.999	0.999
Permetrina, g/L	50-500	352109	-662771	0.998	0.996
S-bioaletrina, g/L	1-10	186928	-12445	0.996	0.993
Temefos, g/kg	5-20	116309	16032	0.999	0.999

**tabla 3.** Estimación de la exactitud de los métodos

	Concentración esperada	Concentración obtenida	% Recuperación	sesgo
Bendiocarb, g/kg	750.0	754.56	100.6	4.56
Permetrina, g/L	125.0	103.21	82.6	-21.79
Temefos, g/kg	10.0	9.54	95.4	-0.46
S-bioaletrina, g/L	1.0	0.77	77.0	-0.23

Crterios de aceptación para % Recuperación:  
bendiocarb= 98-102, permetrina= 97-103, temefos= 95-105, s-bioaletrina= 75-125.

### 3.2. Ingrediente activo

Se recolectaron tres muestras de Ficam W, y dos de Aqua Reslin Super y de T.M. Fos 1%G cada uno. Las concentraciones de bendiocarb, permetrina y temefos de los lotes 2, 1 y 2, respectivamente, excedieron los límites máximos permitidos por la OMS, mientras que la permetrina del lote 2 de Aqua Reslin Super tuvo un valor que no alcanzó el límite inferior de estas especificaciones, en tanto que en la s-bioaletrina se obtuvie-

ron resultados bastante cercanos a los que declaró el fabricante (Tabla 4).

En cuanto a la comparación del contenido de temefos entre los productos de distintos fabricantes, cabe mencionar que la concentración declarada en la etiqueta de éstos fue de 1% (10 g/kg), por lo que se esperaban encontrar valores próximos a esta cifra y dentro de los límites de aceptación de la OMS; de esta manera, sólo uno de los cuatro insecticidas tuvo una concentración

**tabla 4.** Contenido de ingrediente activo (I. A.) de los insecticidas

Producto	no. Lote	I.A. Declarado (g/kg o g/L)	I. A. Obtenido (g/kg ó g/L)	especificaciones de la OMs (g/kg o g/L)
Ficam W	1	760 Bendiocarb	770	735-785
	2		792	
	3		769	
Aqua Reslin Super	1	108.7 Permetrina	121.9	102-115
	2		100.9	
	1	1.5 S-bioaletrina	1.51	1.28-1.73
	2		1.48	
T.M. Fos 1%G	1	10 Temefos	12.3	7.5-12.5
	2		13.8	

**Tabla 5.** Contenido de temefos de larvicidas granulados

Marca comercial	Valor declarado (g/kg)	Valor obtenido (g/kg)	Especificaciones de la OMS (g/kg)
Química Lucava	10	6.1	7.5-12.5
BASF Mexicana		8.9	
Agromundo		10.4	
Quimix		10.9	

por debajo de dichos límites (*Química Lucava*: 6.1 g/kg), en tanto que *BASF Mexicana* presentó un valor de 8.9 g/kg; en las demás muestras se encontraron valores muy cercanos a 10 g/kg (Tabla 5).

### 3.3. Propiedades físicas

Los resultados de pH de Ficam W estuvieron entre 7.2-7.6 y de Aqua Reslin Super de 4.9-5.0, mientras que en la humectabilidad, el lote 3 de Ficam W presentó un valor que excedió los 60 segundos del límite máximo permitido. Los niveles de espuma persistente fueron altos en las dos muestras de Aqua Reslin Super; en el tamiz de partículas de los dos lotes analizados, el porcentaje de los gránulos que pasaron a través de la malla de 1.25 mm de apertura fue menor que lo establecido; en la densidad aparente se encontraron valores aceptables (Tabla 6).

## 4. Discusión

### 4.1. Desempeño de los métodos

En la evaluación de la precisión, se lograron resultados satisfactorios en virtud de que se obtuvieron coeficientes de variación inferiores a los especificados en las guías de validación. La respuesta lineal observada en las gráficas y la distribución aleatoria de los residuales, aunados al cumplimiento de los criterios establecidos para los coeficientes de correlación y determinación, confirman la linealidad de los métodos en los intervalos señalados. Se demostró exactitud en el análisis de bendiocarb, temefos y s-bioaletrina, pero no en permethrina. La razón por la cual se hayan determinado los límites de cuantificación y de detección solamente al temefos y s-bioaletrina fue debido a la importancia de asegurar resultados confiables a bajas concentraciones.

**Tabla 6.** Resultados de los análisis de propiedades físicas\* de insecticidas

Producto	no. Lote	pH	H. (s)	e. P. (mL)	s (%)	D. A. (g/mL)	Prueba de tamiz (%)	
Ficam W	1	7.71	34.0	6	75.5	NA	NA	
	2	7.20	52.0	9.5	84.4	NA	NA	
	3	7.64	69.5	8.5	75.6	NA	NA	
Aqua Reslin Super	1	5.00	NA	28	NA	NA	NA	
	2	4.93	NA	30	NA	NA	NA	
T.M. Fos 1%G	1	NA	NA	NA	NA	1.290	1.25 mm	65.7
							0.25 mm	0.11
	2	NA	NA	NA	NA	1.333	1.25 mm	69.3
							0.25 mm	0.12

\* ESPECIFICACIONES DE LA OMS: pH (El que declara el fabricante), Humectabilidad (<60 s), Espuma persistente (<25 mL), Suspensibilidad (>60%), Densidad Aparente (1.20-1.60 g/mL), Prueba de Tamizaje (Tamiz de 1.25 mm: >98%; Tamiz de 0.25 mm: <2%). Unidades: s: segundos, mL: mililitros, g: gramos, mm: milímetros. Abreviaturas: NA: No aplica. Símbolos: %: porcentaje.

nes de ingrediente activo en la formulación, como es el caso de estos dos compuestos. En términos prácticos, la sensibilidad del método nos está indicando que por cada g/kg ó g/L de ingrediente activo en una muestra analizada le corresponderá un área de pico ( $\mu\text{V/s}$ ) de 19301 para bendiocarb, 352109 para permetrina, 186928 para temefos y 116309 en el caso de la s-bioaletrina, y cuanto mayor sea esta área mayor es la sensibilidad. En términos generales, se demostró que los métodos analíticos examinados poseen un desempeño aceptable.

#### 4.2. Ingrediente activo

Existió heterogeneidad respecto al contenido de ingrediente activo en las muestras analizadas, puesto que unos lotes presentaron cifras mayores al valor declarado y, por el contrario, en otros no se encontraron resultados consistentes con lo plasmado en las etiquetas de los productos, llegando inclusive a estar por debajo de los límites de referencia de la OMS. Por otro lado, son de destacar los resultados obtenidos para s-bioaletrina, debido a que se encontraron valores muy próximos al nominal, cumpliendo satisfactoriamente la evaluación y hablando positivamente de la calidad del producto.

En la comparación de distintas marcas comerciales de temefos, sólo dos de éstas contuvieron la cantidad de ingrediente activo declarada en su certificado de análisis; las demás presentaron valores inferiores a los 10 g/kg señalados, llegando a estar por debajo del valor mínimo aceptable, como fue el caso del producto de *Química Lucava*; en lo que se refiere a la muestra de *BASF Mexicana*, la concentración de 8.9 g/kg obtenida fue inferior a la declarada en la etiqueta del producto, no obstante cumplió con las especificaciones de calidad que indican que el ingrediente activo no debe ser menor al 25% del contenido declarado por el fabricante, es decir, no menor a 7.5 g/kg de temefos. Es muy importante mencionar que las interpretaciones realizadas sobre este ejercicio de comparación solamente aplican a las muestras analizadas y no a los lotes de donde provienen, ya que no se obtuvieron a partir de un muestreo sistemático.

#### 4.3. Propiedades físicas

En la mayoría de las pruebas físicas realizadas hubo al menos un lote con valores que no cumplieron con las especificaciones de la OMS, por ejemplo, el lote 3 del Ficam W excedió el límite permisible para humectabi-

lidad de polvos (<60 s), los dos lotes de Aqua Reslin Super presentaron valores de espuma persistente mayores a dichas especificaciones, y por último, los dos lotes del T.M. Fos 1%G no pasaron la prueba de tamiz en la malla de 1.25 mm de apertura. Si bien es cierto estas pruebas no pueden emular lo que ocurra en el campo ni tampoco definir cómo se comportará un producto bajo ciertas condiciones, sin embargo, nos brindan información importante acerca de sus características físicas para poder juzgar si éstas son satisfactorias o no, por lo que es primordial realizar estos ensayos para determinar la idoneidad de cada formulación con el objetivo de garantizar la confiabilidad en el manejo y su aplicación.

#### 4.4. Consideraciones finales

A la luz de estos resultados, es imperante la necesidad de que se diseñe y ejecute un programa de control de calidad de los insecticidas que las instituciones de salud vayan a adquirir, y que se destinen recursos para crear y/o fortalecer laboratorios con la suficiente capacidad técnica para proporcionar estos servicios analíticos, pues no es suficiente dar por aceptados lotes de productos para su compra basándose solamente en el certificado que otorga el fabricante, sino contar con evidencia científica sólida para el aseguramiento de la calidad lote por lote que contribuya a la toma de decisiones; esto reducirá los riesgos a la salud vinculados con el manejo y uso de los productos, mejorará la efectividad de las estrategias del control químico de vectores y favorecerá el factor costo-beneficio de estas intervenciones tan importantes para la salud pública. Por último, debe aclararse que este trabajo no pretende exhibir a ninguna compañía formuladora de insecticidas mediante la presentación de los resultados, por lo que no debe entenderse como una crítica dirigida a estas empresas sino como un ejercicio que tiene la finalidad de coadyuvar a mejorar la calidad y crear una cultura de exigencia en las instituciones sanitarias para la procuración de los productos más calificados para la prevención y control de las enfermedades transmitidas por vectores.

#### Agradecimientos

A la Ing. Elizabeth C. de Águila del Laboratorio de Control de Calidad de Plaguicidas del MAG/OIRSA de El Salvador C.A. por su asesoría técnica. A las IBQ. Rocío Jiménez y Sayira Cruz por su apoyo técnico. A la Dra. Patricia Penilla y a la QBP. Katia Campos Iturralde

por su revisión crítica del manuscrito. Al personal del Departamento de Prevención y Control de Enfermedades Transmitidas por Vectores de la Secretaría de Salud de Guerrero por las facilidades otorgadas para la recolección de muestras. Este trabajo fue realizado con financiamiento del Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Guerrero, México, proyecto GUE-2008-C01-92625.

## Referencias

- Australian Pesticides and Veterinarian Medicines Authority.** Guidelines for the validation of analytical methods for active constituent, agricultural and veterinary chemical products [monografía en internet]. Kingston: Australian Pesticides and Veterinarian Medicines Authority, 2004 [consultado 2009 junio 6]. Disponible en: [http://www.apvma.gov.au/publications/guidelines/docs/gl\\_69\\_analytical\\_method](http://www.apvma.gov.au/publications/guidelines/docs/gl_69_analytical_method)
- Collaborative International Pesticides Analytical Council.** 1985. "CIPAC Handbook vol. 1C". Marston Book Services Ltd. Abingdon, Oxfordshire. pp. 2230-2232.
- Collaborative International Pesticides Analytical Council.** 1988. "CIPAC Handbook vol. D". Marston Book Services Ltd. Abingdon, Oxfordshire. pp. 10-12.
- Collaborative International Pesticides Analytical Council.** 1994. "CIPAC Handbook vol. F". Marston Book Services Ltd. Abingdon, Oxfordshire. pp. 152-153, 164-166, 173-176, 205-206, 394-398.
- Collaborative International Pesticides Analytical Council.** 2006. "CIPAC Handbook vol. L". Marston Book Services Ltd. Abingdon, Oxfordshire. pp. 31-37.
- Collaborative International Pesticides Analytical Council.** 2009a. Guidelines on method validation to be performed in support of analytical methods for agrochemical formulations [monografía en internet, consultada 2009 agosto 29] Disponible en: <http://www.cipac.org/document/Guidance%20Documents/validat.pdf>
- Collaborative International Pesticides Analytical Council.** 2009b. "CIPAC Handbook vol. M". Marston Book Services Ltd. Abingdon, Oxfordshire. pp. 155-158.
- eurachem Working Group.** 1998. "The fitness for purpose of analytical methods". Teddington: LGC Ltd.
- FAO/WHO Joint Meeting on Pesticide specifications.** Manual on development and use of FAO and WHO specifications for pesticides [monografía en internet]. Roma: World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006 [consultado 2009 septiembre 22]. Disponible en: [http://whqlibdoc.who.int/publications/2006/9251048576\\_eng\\_update2.pdf](http://whqlibdoc.who.int/publications/2006/9251048576_eng_update2.pdf)
- Jhang Js, Chang CC, Fink DJ, Kroll MH.** 2004. "Evaluation of linearity in the clinical laboratory". Archives of Pathology and Laboratory Medicine. pp. 128:44-48.
- Organización de las naciones unidas para la Agricultura y la Alimentación.** Código internacional de conducta para la distribución y utilización de plaguicidas [monografía en internet]. Roma: FAO, 2006 [consultado 2009 enero 21]. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPP/Pesticid/Code/Download/MonitoringSpanish08.pdf>
- t holen DW, Kroll MH, Rex-Astles J, Caffo AL, Happe t M, Krouwer J, et al.** 2003. "Evaluation of the linearity of quantitative measurement procedures: A Statistical Approach; Approved Guideline. Pennsylvania: Clinical and Laboratory Standards Institute; vol.23.
- WHO** Pesticide Evaluation Scheme. Quality control of pesticide products; guidelines for national laboratories [monografía en internet]. World Health Organization, 2005 [consultado 2009 julio 25]. Disponible en: [http://whqlibdoc.who.int/hq/2005/WHO\\_CDS\\_WHOPES\\_GCDPP\\_2005.15.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2005/WHO_CDS_WHOPES_GCDPP_2005.15.pdf)
- WHO** Pesticide Evaluation Scheme. Sampling procedures [monografía en internet]. World Health Organization, 1999 [consultado 2009 mayo 17]. Disponible en: <http://www.who.int/whopes/quality/en/methodm1.pdf>
- World Health Organization.** Global strategic framework for integrated vector management [monografía en internet]. Geneva, World Health Organization, 2004. [consultado 2009 marzo 21]. Disponible en: [http://whqlibdoc.who.int/hq/2004/WHO\\_CDS\\_CPE\\_PVC\\_2004\\_10.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2004/WHO_CDS_CPE_PVC_2004_10.pdf)

Recibido: Julio 15 de 2011.

Aceptado para su publicación: Marzo 2 de 2012.

# PROCESOS PARA LA CAPTURA DE CO<sub>2</sub>. EMISIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO Y DE AZUFRE DURANTE LA OXI-COMBUSTIÓN DE UN CARBONIZADO

Astrid sánchez\*, eric eddings\*\*, Fanor Mondragón\*\*\*

## Resumen

**sánchez A.; e. eddings; F. Mondragón:** Procesos para la captura de CO<sub>2</sub>. Emisión de óxidos de nitrógeno y de azufre durante la oxi-combustión de un carbonizado. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **36** (138): 115-123, 2012. ISSN 0370-3908.

El carbón es uno de los combustibles fósiles más empleados para la producción de energía eléctrica, y para diferentes actividades industriales y domésticas. Sin embargo, el uso de este combustible genera emisiones nocivas para el ambiente; entre ellos se encuentra el CO<sub>2</sub>, principal producto de combustión que actúa como gas de efecto invernadero. Se han estudiado diferentes procesos con el fin de disminuir la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, entre ellos se encuentra la oxi-combustión, que consiste en emplear una atmósfera enriquecida en O<sub>2</sub>, con el fin de obtener una alta concentración de CO<sub>2</sub> en los gases de combustión que facilite su separación. El incremento en la presión parcial de O<sub>2</sub> genera cambios importantes en el ambiente químico de la combustión que afecta las reacciones de oxidación y emisión de contaminantes como SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>. En la presente investigación se encontró que en procesos de oxi-combustión, altas concentraciones de CO<sub>2</sub> promueve la formación de NO<sub>2</sub>. Por lo tanto, es importante evaluar los efectos que tendrán estas modificaciones en el proceso global.

**Palabras clave:** dióxido de carbono, captura de CO<sub>2</sub>, perfiles de combustión, emisiones.

## ABSTRACT

Coal is a fossil fuel widely employed to produce electric power, industrial and residential heating, among other activities. However, coal combustion produces pollutant emissions with negative impact on the environment. The main product of combustion is CO<sub>2</sub>, considered a greenhouse gas that can contribute to climate change. Different technologies have been proposed with the aim to diminishing CO<sub>2</sub> emissions to the atmosphere. One of the alternatives consists in the use of a high O<sub>2</sub> concentration, almost free of nitrogen, during combustion in order to obtain the exhaust gases with high CO<sub>2</sub>

\* Instituto de Química, Universidad de Antioquia, A.A. 1226, Medellín, Colombia

\*\* Department of Chemical Engineering. University of Utah. 50 So Central Campus Dr. Salt Lake City, USA.

\*\*\* fmondra@gmail.com

content, which can facilitate its separation. The increasing in  $O_2$  partial pressures causes important changes in the chemical environment of the combustion which affects the oxidation reactions and the pollutants emissions, such as  $NO_x$  and  $SO_x$ . In this research it was found that under oxy-combustion conditions, high  $CO_2$  concentrations promote  $NO_2$  formation. Therefore, it is important to determine the effect of these modifications on the global process.

**Keywords:** carbon dioxide,  $CO_2$  capture, combustion profiles, emissions.

## Introducción

La humanidad ha obtenido la energía necesaria para sus actividades diarias a partir de dos alternativas, las fuentes renovables (solar, térmica, hidroeléctrica, entre otras) y las fuentes no renovables (carbón, petróleo, gas natural y energía nuclear). De éstas, el carbón y el petróleo han sido principalmente usados desde la Revolución Industrial.

A nivel mundial, el carbón fue la fuente más empleada en la última década (Graus & Worrell, 2011), supliendo cerca del 40% de la demanda energética global, y es muy probable que este combustible continúe en esta importante posición ya que es abundante y ampliamente distribuido en la superficie de la tierra (Campbell & Mitchell, 2008), además tiene un precio relativamente bajo y es fácil de transportar comparado con otras fuentes fósiles.

El principal problema asociado con el uso de carbón está relacionado con las emisiones que se generan (Mastral, Callén et al., 1999), cuyos principales contribuyentes son el material particulado, los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y las emisiones de gases de efecto invernadero (Gupta, 2007).

Los principales productos de combustión son  $CO_2$  y  $H_2O$ , pero, el carbón contiene azufre y nitrógeno en su estructura, que son convertidos a dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y compuestos nitrogenados  $N_xO_y$  ( $NO_x$ ,  $N_2$  y  $N_2O$ ) (Perry, 2004), donde  $NO_x$  incluye la formación de  $NO$  y  $NO_2$  (normann, Andersson et al., 2009), durante el proceso de combustión.

Los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno son gases que pueden causar lluvia ácida. El  $NO$  contribuye a la formación de smog fotoquímico, el  $N_2O$  está involucrado indirectamente en el deterioro de la capa de ozono (Thomas, 1997; Zhu, Lu et al., 2009) y junto con el  $CO_2$  son gases de efecto invernadero (Ren, Zhao et al., 2008).

La formación de lluvia ácida ocurre cuando el  $SO_2$  y  $NO_x$  emitidos a la atmósfera se convierten en ácido sulfúrico y nítrico respectivamente, que subsecuentemente son disueltos en las gotas de agua lluvia (Perry, 2004). El efecto invernadero causa un incremento de la temperatura atmosférica, que se ha asociado con las emisiones de  $CO_2$  debido a las grandes cantidades emitidas (Wall, 2007), que son a su vez afectadas por el tamaño de la población humana y la cantidad de energía usada por persona.

La emisión de material particulado causa efectos adversos en la salud e impactos negativos en el ambiente, con el objetivo de reducir esta emisión se han desarrollado ciclones, aunque su eficiencia es relativamente baja para material con tamaño menor a 10  $\mu m$  (Liu, Xu et al., 2007).

El control de las emisiones de  $SO_2$  se realiza por medio de la adición de caliza (Armesto, Boerrigter et al., 2003; Perry, 2004), que reacciona con el  $SO_2$  para producir  $CaSO_4$  que puede ser fácilmente extraído en forma sólida, evitando la liberación de  $SO_2$  en forma gaseosa al ambiente. En algunos casos se realiza un tratamiento antes de la combustión de carbón (Cheng, Zhou et al., 2003), con el fin de remover el azufre (Matsuoka, Abe et al., 2001).

La combustión de carbón pulverizado, representa una de las principales fuentes de  $NO_x$  (Zhu, Lu et al., 2009), dados sus impactos negativos, desde 1970 y hasta ahora, existen regulaciones estrictas con respecto a sus emisiones a nivel global (normann, Andersson et al., 2009). El nitrógeno ingresa al sistema de combustión por dos vías importantes, una es el aire empleado para la combustión que contiene un 79% de  $N_2$ , y la otra es el nitrógeno asociado a la estructura química del carbón (fuel-N), que usualmente está presente en un rango de 0.7% - 2.1% en masa (Valentim, Sousa et al., 2006).

A partir de estas fuentes la formación de NxOy puede presentarse por tres mecanismos básicamente: el N<sub>2</sub> del aire es oxidado a alta temperatura (NO térmico) (Park, Park et al., 2006; normann, Andersson et al., 2008; normann, Andersson et al., 2009; t oftegaard, Brix et al., 2010), o también puede reaccionar con radicales CH provenientes del combustible, dando lugar a la formación de intermedios que son fácilmente oxidados (Fenimore, 1971). El nitrógeno en la estructura del carbón puede dar lugar a la formación de NxOy a través de la oxidación de compuestos volátiles o por oxidación heterogénea del N contenido en el carbonizado (Glarborg, Jensen et al., 2003). En los volátiles, el N se presenta como NH<sub>3</sub>, HCN, y compuestos aromáticos de bajo peso molecular (Baxter, Mitchell et al., 1996; Armesto, Boerrigter et al., 2003), que son transformados a través de una serie de reacciones homogéneas a NO o N<sub>2</sub>; mientras el nitrógeno en el carbonizado reacciona a través de una serie de reacciones heterogéneas que tienen lugar simultáneamente con la oxidación del carbonizado (normann, Andersson et al., 2008) dando lugar a NOx, N<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O (t homas, 1997).

Los productos de oxidación dependerán de la concentración de especies radicalarias O/OH/H propias de las condiciones de combustión (normann, Andersson et al., 2009). Por medio de estas rutas el carbón produce más NOx por unidad de energía producida que cualquier otra tecnología de combustión (Baxter, Mitchell et al., 1996).

Para el control de NxOy se han desarrollado diferentes tecnologías, como "reburning", "low-NOx burners", reducción catalítica selectiva, combustión en lecho fluidizado (Normann, Andersson et al., 2009), entre otras.

Entre 1997 y 2006, el consumo de energía global incrementó a una velocidad anual de 2.3%, desde 402.0 EJ a 494.9 EJ (Liu, Georgiadis et al., 2010), durante el mismo período las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaron a una velocidad de 2.6%, pasando de 23.2 billones de toneladas métricas a 29.2 billones de toneladas métricas (Liu, Georgiadis et al., 2010). Los sectores que más aportaron a este incremento fueron la electricidad, la generación de calor a nivel industrial y el transporte.

En Colombia se tiene un escenario similar, donde el CO<sub>2</sub> incrementó en el 2008 y se alcanzaron los 65.1 millones de toneladas métricas (www.eia.doe.gov, 2010), dando lugar a una contribución del 0.21 % de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> a nivel mundial.

Aproximadamente 91 kg de CO<sub>2</sub> son producidos por cada 100 kW h de electricidad producida cuando un carbón bituminoso es quemado con una eficiencia del 34% (Campbell & Mitchell, 2008). Debido al impacto que puede causar el CO<sub>2</sub> en el cambio climático y dado su incremento en años recientes, es necesario reducir estas emisiones pero sin afectar la producción de energía; para esto se cuenta con diferentes alternativas (Wall, 2007):

Las principales opciones son mejorar la eficiencia en las plantas convencionales, hacer un uso más adecuado de la energía, usando una proporción mayor de recursos renovables (Liu, Georgiadis et al., 2010), sustitución de carbón por gas (Wall, 2007), y la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, llamada CCS por sus siglas en inglés (Carbon Capture and Storage).

Es importante notar que aunque la reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> es posible cambiando la tecnología o el combustible empleado, las necesidades actuales deben ser satisfechas, de esta manera, la propuesta de capturar el CO<sub>2</sub> emitido es una de las opciones más atractivas, mientras se desarrollan sistemas más eficientes o nuevas tecnologías para el uso de combustibles alternos.

Todas las tecnologías de CCS incluyen la compresión de CO<sub>2</sub> producido a un estado supercrítico, antes del transporte y almacenamiento (Wall, 2007). Este proceso impone una pérdida en la eficiencia del proceso de generación de energía (Wall, Liu et al., 2009). Actualmente se adelantan numerosas investigaciones para desarrollar tecnologías que faciliten la captura de CO<sub>2</sub>, dentro de las cuales se han propuesto principalmente cuatro:

*Captura pre-combustión:* En la captura pre-combustión el carbono es removido antes del proceso de oxidación del combustible (Figuroa, Fout et al., 2008), por medio un reactor de gasificación para producir gas de síntesis (CO e H<sub>2</sub>), posteriormente el CO es oxidado a CO<sub>2</sub> por medio de la reacción con H<sub>2</sub>O produciendo más H<sub>2</sub>. El H<sub>2</sub> es separado y enviado al reactor de combustión, mientras el CO<sub>2</sub> es capturado (Figuroa, Fout et al., 2008). Este proceso implica el desarrollo de nuevos equipos que puedan utilizar hidrógeno como combustible.

*Captura pos-combustión:* En la captura pos-combustión, el CO<sub>2</sub> es separado de los otros gases producidos (Figuroa, Fout et al., 2008) por medio de

sorbentes químicamente activos (Wall, 2007); en general, se utilizan sorbentes basados en aminas que reaccionan con el  $\text{CO}_2$  a baja concentración (12% - 15%), si el combustible empleado es carbón o 4% - 8%, si el combustible es gas natural (Figueroa, Fout et al., 2008). Las aminas son regeneradas por medio de calentamiento y el  $\text{CO}_2$  es liberado en forma casi pura para ser comprimido y almacenado (Rochelle, 2009). El principal inconveniente con esta tecnología es el costo por la regeneración del sorbente y, adicionalmente el exceso de  $\text{O}_2$  y  $\text{SO}_2$  causan la degradación de las aminas (Wall, 2007).

*Oxi-combustión:* El principal problema con la separación de  $\text{CO}_2$  a partir de combustión convencional es su baja concentración, que está alrededor de 15% en volumen (Rathnam, Elliott et al., 2009) (seepana & Jayanti, 2010), haciendo necesario procesos adicionales de purificación y separación. Sin embargo, sí la combustión se lleva a cabo con una mayor concentración de  $\text{O}_2$  (Bejarano & Levendis, 2008), el  $\text{CO}_2$  producto de la reacción también se obtendrá en mayor concentración (Rathnam, Elliott et al., 2009) facilitando la separación del  $\text{CO}_2$ . Este procedimiento constituye el principio de la tecnología conocida como oxi-combustión, que fue propuesto inicialmente en 1982 (Wall, Liu et al., 2009).

El  $\text{O}_2$  puede ser suplido por medio de una unidad de separación de aire. Sin embargo, el uso de alta concentración de  $\text{O}_2$  genera temperaturas muy altas en los hornos, provocando daños en los reactores, por este motivo se ha planteado la recirculación de gases de exhosto, conteniendo principalmente  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (Bejarano & Levendis, 2008; Rathnam, Elliott et al., 2009), de esta manera la reacción se lleva a cabo en  $\text{O}_2/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  en lugar de  $\text{O}_2/\text{N}_2$  (Bejarano & Levendis, 2008), como en el caso de la combustión convencional. El  $\text{H}_2\text{O}$  puede ser fácilmente condensada permitiendo la captura de  $\text{CO}_2$  sin procesos adicionales.

Cuando se lleva a cabo la sustitución de  $\text{N}_2$  por  $\text{CO}_2$  se inducen cambios en el ambiente químico del proceso de combustión, ya que estos gases tienen propiedades físico-químicas diferentes, como la capacidad calorífica, el peso molecular, la densidad, la difusividad de  $\text{O}_2$  en cada uno de los gases, entre otras (Wall, Liu et al., 2009; Zhang, Binner et al., 2010). Estas diferencias causan variaciones en el comportamiento de combustión tales como estabilidad, ignición y propagación de la llama, temperatura de gases, conversión del material carbonoso, emisión de contaminantes (Czakiert, Bis

et al., 2006; Bejarano & Levendis, 2008; Rathnam, Elliott et al., 2009; Wall, Liu et al., 2009; Czakiert, sztekler et al., 2010). Algunas diferencias pueden ser parcialmente explicadas por la menor temperatura de combustión generada al reemplazar el  $\text{N}_2$  por el  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, es importante tener en cuenta los efectos químicos generados por el incremento del  $\text{CO}_2$  u  $\text{O}_2$  durante la combustión.

El diseño de las plantas de oxi-combustión puede ser dividido en dos generaciones. Una primera generación se basa las modificaciones de condiciones operativas con el fin de imitar la combustión convencional con aire (normann, Andersson et al., 2009), y la segunda, basada en el diseño de nuevos reactores y nuevas condiciones (normann, Andersson et al., 2009), que permitan aumentar la eficiencia del proceso y disminuir las emisiones. Ambas tendencias requieren el estudio detallado de la reactividad de los combustibles en el nuevo ambiente químico con el fin de comprender los cambios en el proceso que permitan obtener información para desarrollos a nivel de planta piloto y/o escala industrial.

La presente investigación se enfocó en el análisis del efecto que tiene el aumento de la presión parcial de  $\text{O}_2$  y de  $\text{CO}_2$  en la evolución de óxidos de nitrógeno en los procesos de oxi-combustión.

## Metodología experimental

Para las reacciones de oxidación en lecho fluidizado se utilizó un reactor de acero inoxidable de un diseño especial tal que permitía la adición de las muestras del material carbonoso a las condiciones de reacción. Los gases producto de la reacción fueron analizados por medio de una celda de gases acoplada a un espectrómetro infrarrojo Nicolet 560. Los espectros fueron tomados cada dos segundos dando lugar a perfiles de combustión muy detallados, la metodología experimental es descrita en detalle en un trabajo anterior (sánchez, eddings et al., 2010).

## Materiales

Un carbonizado obtenido a partir de un carbón de la región de Boyacá fue empleado para llevar a cabo este estudio. En cada experimento se emplearon 5 partículas de carbonizado dando lugar a una masa entre 10-14 mg de carbonizado (BC).

El carbonizado fue caracterizado mediante diferentes técnicas, donde se pudo determinar que el material es principalmente de naturaleza microporosa, ya que el área BET obtenida por medio de un sorptómetro ASAP 2000 - *Micromeritics* fue del orden 4 m<sup>2</sup>/g, mientras el área obtenida por adsorción de CO<sub>2</sub> empleando el modelo de Dubinin-Radushkevich fue de 377 m<sup>2</sup>/g.

El análisis próximo fue realizado en un analizador termogravimétrico 2950 - *TA Instruments*, indicando que es un material de alta estabilidad térmica con un porcentaje de volátiles de 0.2 %; 93,9 % de carbono fijo y 6.1 % de cenizas.

La composición elemental fue obtenida en un equipo TruSpec CHNS Micro - *LECO*, indicando que este material contiene 85.7 % de C, 0.5 % de N, 2.8% de S y 0.5 % de H.

## Resultados

El carbonizado fue sometido a diferentes experimentos de combustión, donde se incrementó la presión parcial de O<sub>2</sub> y posteriormente se incrementó la concentración de CO<sub>2</sub> con el fin de determinar el efecto de ambas modificaciones en el sistema.

### Incremento de la presión parcial de O<sub>2</sub>

Debido a la naturaleza y estabilidad térmica del material empleado, no hubo evidencia de gasificación con CO<sub>2</sub> a 800°C; esto puede ser evidenciado por la ausencia de señales de CO en los espectros resultantes y el área de la señal de CO<sub>2</sub> permanece constante.

Las Figura 1-Figura 4 muestran los perfiles de evolución de las especies durante la combustión del carbonizado para 21O<sub>2</sub>/79Ar (léase como 21% de O<sub>2</sub> y 79 % de Ar), 30O<sub>2</sub>/70Ar, 40O<sub>2</sub>/60Ar y 100% de O<sub>2</sub>. Es importante mencionar que la combustión empleando aire fue muy similar a 21O<sub>2</sub>/79Ar, permitiendo usar esta mezcla como una referencia.

Hay diferentes observaciones importantes con respecto a la Figura 1. Primero, es importante notar que el NO es la única especie nitrogenada que aparece en los productos de combustión; otra observación importante es con relación a la evolución de SO<sub>2</sub>, indicando que empieza después de la evolución de los otros compuestos, en este caso la detección empieza alrededor de 80 s después de que inicia la evolución de

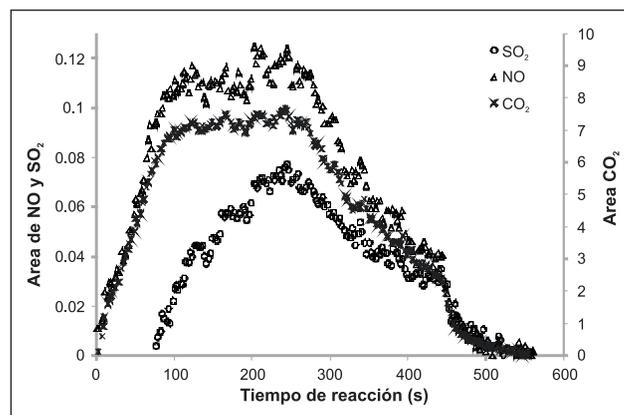


Figura 1. Evolución de gases durante la combustión de la muestra de coque BC en 21O<sub>2</sub>/79Ar

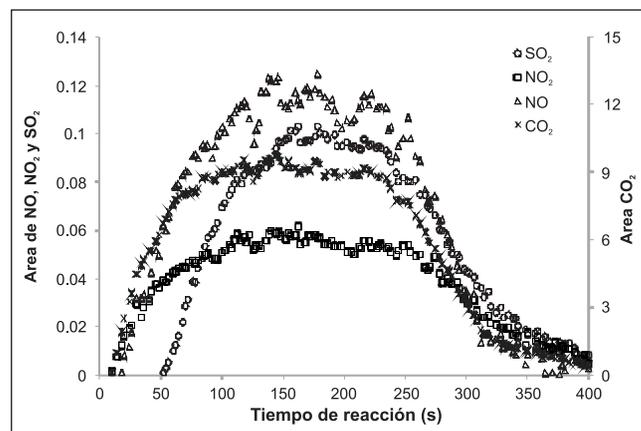


Figura 2. Evolución de CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> durante la combustión de coque BC en 30O<sub>2</sub>/70Ar

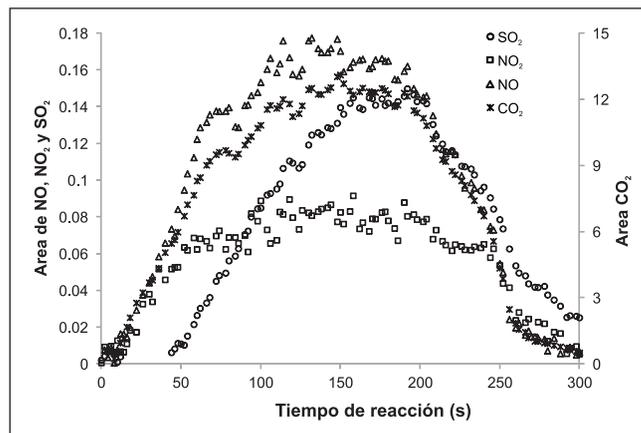


Figura 3. Evolución de CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> durante la combustión de coque BC en 40O<sub>2</sub>/60Ar

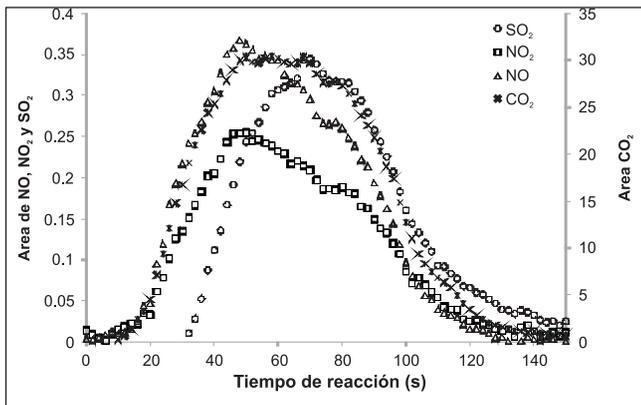


Figura 4. Evolución de CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> durante la combustión de coque BC en 100% O<sub>2</sub>

NO y CO<sub>2</sub>. Este evento se da probablemente debido al encapsulamiento de partículas de pirita por la materia orgánica (Kelemen, Gorbaty et al., 1991), permitiendo la producción de SO<sub>2</sub> después de que el consumo del coque excede un valor específico.

Cuando la presión parcial de O<sub>2</sub> incrementa de 21% a 30% el tiempo de reacción disminuye desde 500 s a 400 s (casi un 20% menos tiempo para consumir la misma cantidad de muestra). La evolución de las especies es más estrecha, y las concentraciones instantáneas son mayores debido al consumo más rápido del material carbonoso. Más importante aun es notar la aparición de la señal de NO<sub>2</sub>, posiblemente debido a la oxidación en fase gaseosa del NO.

Observaciones similares pueden ser apreciadas para los casos 40O<sub>2</sub>/60Ar y 100% O<sub>2</sub>; donde el comportamiento general es resumido a continuación:

El incremento de la presión parcial de O<sub>2</sub> produce una disminución en el tiempo de reacción mientras la concentración máxima de las especies es mayor debido al rápido consumo del material carbonoso.

El área de NO<sub>2</sub> es mayor con el incremento de la concentración de O<sub>2</sub>; adicionalmente, el perfil mostrado por el NO<sub>2</sub> es muy similar al del NO, indicando que posiblemente, sea producto de una oxidación homogénea del NO:  $2\text{NO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{NO}_2$

Finalmente, la evolución de SO<sub>2</sub> es observada después de que las otras especies empiezan a aparecer, el tiempo de retraso del SO<sub>2</sub> puede ser relacionado con la concentración de O<sub>2</sub> pasando de 76 s en el caso 21O<sub>2</sub>/79Ar a 32 s para el 100% de O<sub>2</sub>. Este compor-

tamiento es de esperar ya que las especies químicas son liberadas con mayor rapidez. En todos los casos el SO<sub>2</sub> empieza a aparecer cuando el CO<sub>2</sub> corresponde al 7% - 10% del total producido.

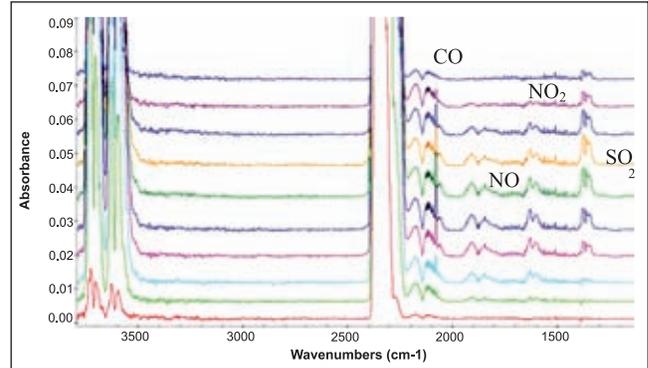


Figura 5. Espectros FTIR relevantes para la combustión de carbonizado en 100% O<sub>2</sub>. Los espectros fueron tomados a diferentes tiempos: (12, 22, 32, 42, 48, 62, 72, 90, 102 y 120 s) empezando por el espectro rojo (de abajo hacia arriba en la figura).

La Figura 5 muestra los espectros relevantes seleccionados a partir de la Figura 4, donde la combustión fue llevada a cabo en 100% O<sub>2</sub>. De esta figura es posible observar que el SO<sub>2</sub> es detectado después de 32 s de reacción, mientras el CO y CO<sub>2</sub> son detectados a los 12 s y el NO y NO<sub>2</sub> después de 22 s de reacción.

En la Figura 5 también es importante notar la presencia de CO, a pesar de la alta concentración de O<sub>2</sub>, este comportamiento podría ser explicado por la estabilidad térmica del material y la baja temperatura a la que se llevó a cabo la combustión (800 °C).

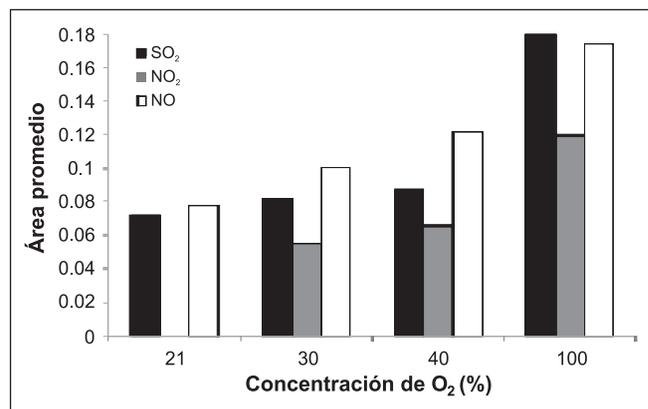
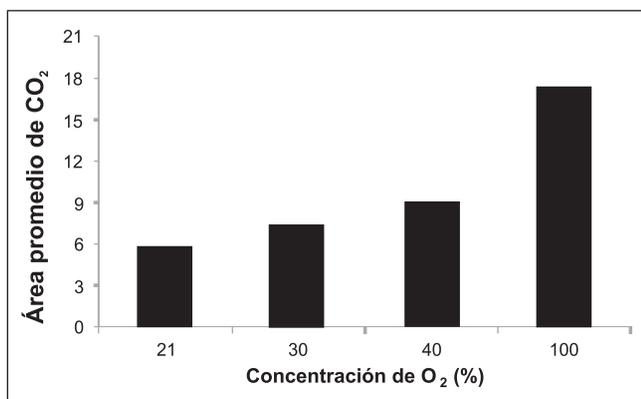


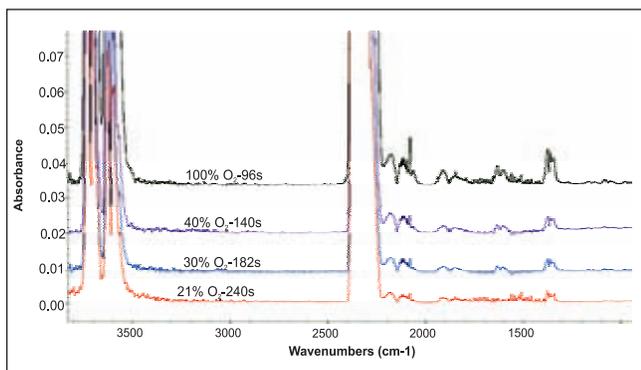
Figura 6. Área promedio de NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> durante la combustión de carbonizado incrementando la presión parcial de O<sub>2</sub> en Ar.

El área promedio de cada perfil fue obtenido integrando cada curva y dividiendo por el tiempo necesario para la desaparición completa de las señales. La Figura 6 muestra el área promedio durante la combustión para cada escenario para el NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> y la Figura 7 muestra el resultado en el caso del CO<sub>2</sub>, donde es evidente que el área incrementa gradualmente con la presión parcial de O<sub>2</sub>. El incremento en la concentración promedio es debido a la reducción del tiempo necesario para el completo consumo del carbonizado implicando una menor cantidad de gases de reacción.



**Figura 7.** Área promedio de CO<sub>2</sub> durante la combustión con el incremento de la presión parcial de O<sub>2</sub>.

La Figura 8 muestra el espectro correspondiente a la máxima evolución durante la combustión seleccionados de las Figuras 1 a 4 para cada concentración evaluada.



**Figura 8.** Espectros correspondientes a la máxima evolución para 21%O<sub>2</sub>(rojo), 30%O<sub>2</sub> (azul), 40%O<sub>2</sub> (violeta) y 100%O<sub>2</sub> (negro) en Ar. Junto a la concentración de oxígeno aparece el tiempo de reacción.

A partir de la Figura 8 es posible observar que todas las especies incrementan, especialmente el SO<sub>2</sub> cuando la combustión se lleva a cabo con 100% O<sub>2</sub>. Es evi-

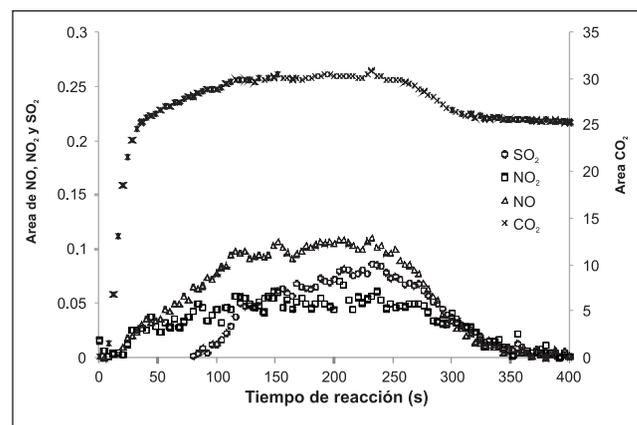
dente que empleando 21%O<sub>2</sub> la señal de NO<sub>2</sub> no es detectada y el área de NO es muy pequeña. La emisión de CO aumenta probablemente debido a los bajos tiempos de residencia inhibiendo la oxidación heterogénea de CO, o también puede ser debido al aumento de la temperatura local para altas concentraciones de O<sub>2</sub>, lo cual afecta el equilibrio CO/CO<sub>2</sub>.

### Incremento de la concentración de CO<sub>2</sub>

Dada la recirculación de los gases de combustión en el proceso de oxi-combustión, la concentración de CO<sub>2</sub> en los gases de reacción serán mayores que en procesos de combustión convencionales, por lo tanto es importante estudiar el efecto del CO<sub>2</sub> en los perfiles de evolución de las especies. En este caso, se empleó 30% O<sub>2</sub> incrementando gradualmente el CO<sub>2</sub> hasta obtener un balance total del 70%. Esta concentración de O<sub>2</sub> fue seleccionada ya que algunos reportes han indicado que para obtener temperaturas similares a las de combustión convencional el O<sub>2</sub> debe estar entre 28% - 35% para contrarrestar el efecto del mayor calor específico del CO<sub>2</sub> comparado con el de N<sub>2</sub>.

Las Figuras 9 a 11 muestran los perfiles de evolución del CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> para la combustión en las mezclas 30O<sub>2</sub>/xCO<sub>2</sub>/70-xAr; x = 20, 50, y 70. En estas figuras el eje x y el eje principal y son mostrados con la misma escala para facilitar la comparación.

La observación más importante a partir de estas figuras está relacionada con la evolución de NO<sub>2</sub>, anteriormente se concluyó que el NO<sub>2</sub> aumenta con la presión parcial de O<sub>2</sub>. Sin embargo, cuando la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta, manteniendo constante la concen-



**Figura 9.** Combustión de BC en 30O<sub>2</sub>/20CO<sub>2</sub>/50Ar

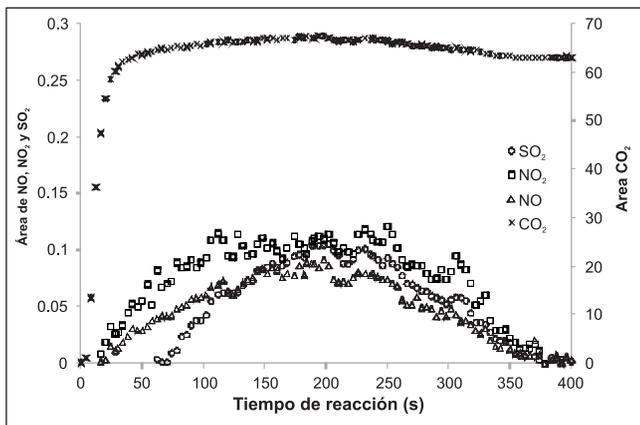


Figura 10. Combustión de BC en 300<sub>2</sub>/50CO<sub>2</sub>/20Ar

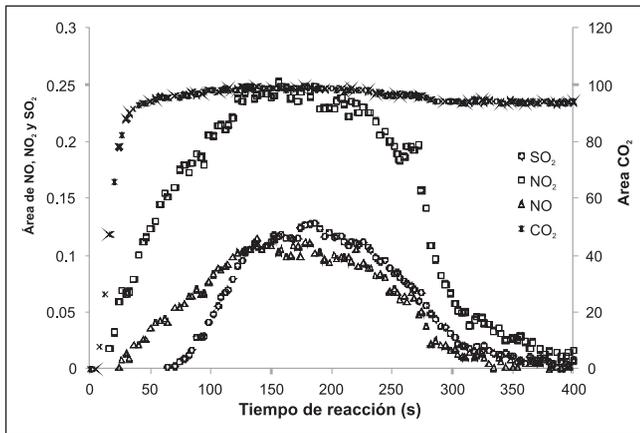


Figura 11. Combustión de BC en 300<sub>2</sub>/70CO<sub>2</sub>

tración de O<sub>2</sub>, el área de NO<sub>2</sub> incrementa en mayor proporción, superando el área de NO. Cuando el CO<sub>2</sub> completamente reemplaza el Ar, el NO<sub>2</sub> tiene el valor más alto (Figura 12).

Esta observación indica que el CO<sub>2</sub> promueve la formación de NO<sub>2</sub> en mayor proporción que la oxidación de NO por O<sub>2</sub>. Este comportamiento podría ser atribuido a efectos del tercer cuerpo o a enfriamientos locales por la mayor cantidad de CO<sub>2</sub>. En la Figura 12 puede apreciarse que el CO<sub>2</sub> no tiene un efecto importante en la formación de NO ni de SO<sub>2</sub>, las áreas determinadas en todos los casos son muy similares, mientras el NO<sub>2</sub> muestra una clara tendencia al incremento.

En estos experimentos también pudo apreciarse que la formación de CO es significativamente afectada por la presencia de CO<sub>2</sub>; cuando el CO<sub>2</sub> reemplaza el Ar el área de CO aumenta aproximadamente en 6 veces su valor, este comportamiento puede ser explicado por di-

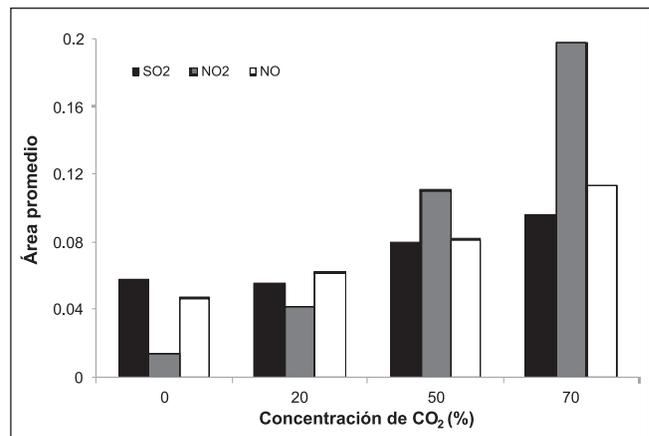


Figura 12. Área promedio para NO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> para 300<sub>2</sub>/xCO<sub>2</sub>/70-xAr, x: concentración de CO<sub>2</sub>

ferentes vías: puede ser producto del desplazamiento del equilibrio:  $CO + OH \leftrightarrow CO_2 + H$ , causado por la alta concentración de CO<sub>2</sub> o puede ser producto de reacciones de gasificación del carbonizado con el CO<sub>2</sub> que pueden ser favorecidas por la presencia de O<sub>2</sub>.

### Conclusiones

La evolución de SO<sub>2</sub> es principalmente afectada por el incremento en la concentración de O<sub>2</sub>, favoreciendo el aumento en su concentración instantánea, lo cual requiere especial atención en los sistemas de combustión. Por otro lado, el CO<sub>2</sub> no tiene un efecto significativo en los perfiles de SO<sub>2</sub>.

Aparentemente, el NO<sub>2</sub> es generado por la oxidación en fase gaseosa del NO, ya que tienen perfiles muy similares. El incremento en la presión parcial de O<sub>2</sub> causa un aumento en la concentración de NO<sub>2</sub>, lo cual podría afectar los materiales de los reactores debido al poder oxidante de esta especie.

La sustitución de Ar por CO<sub>2</sub> tiene dos consecuencias importantes desde el punto de vista ambiental, el incremento en la concentración de NO<sub>2</sub> y CO, siendo importante estudiar en detalle la formación de estas especies con el fin de evitar su liberación al ambiente y dentro de los reactores también debido a posibles daños en los materiales.

El incremento en la presión parcial de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, como ha sido propuesto en oxi-combustión causa grandes diferencias en el proceso, disminuyendo el tiempo de consumo del carbonizado, incrementando la concen-

tración promedio de todas las especies, lo cual podría ser difícil de manejar y en algunos casos modificando o desplazando los equilibrios generando mayor concentración de otras especies nocivas.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia la financiación del Programa Sostenibilidad 2012-2013. A.S. Agradece a Colciencias y a la Universidad de Antioquia la beca doctoral.

## Referencias

- Armesto, L., H. Boerrigter, et al.** 2003. N<sub>2</sub>O emissions from fluidized bed combustion. The effect of fuel characteristics and operating conditions. *Fuel* 82: 1845-1850.
- Baxter, L. L., R. e. Mitchell, et al.** 1996. Nitrogen Release during Coal Combustion. *Energy & Fuels* 10: 188-196.
- Bejarano, P. A. and Y. A. Levendis** 2008. Single-coal-particle combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments. *Combustion and Flame* 153: 270-287.
- Campbell, P. A. and R. e. Mitchell** 2008. The impact of the distributions of surface oxides and their migration on characterization of the heterogeneous carbon-oxygen reaction. *Combustion and Flame* 154: 47-66.
- Cheng, J., J. Zhou, et al.** 2003. Sulfur removal at high temperature during coal combustion in furnaces: a review. *Progress in Energy and Combustion Science* 29: 381-405.
- Czakiert, t., Z. Bis, et al.** 2006. Fuel conversion from oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed. *Fuel Processing Technology* 87(6): 531-538.
- Czakiert, t., K. sztekler, et al.** 2010. Oxy-fuel circulating fluidized bed combustion in a small pilot-scale test rig. *Fuel Processing Technology* 91(11): 1617-1623.
- Fenimore, C. P.** 1971. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. *Symposium (International) on Combustion* 13(1): 373-380.
- Figuroa, J. D., t. Fout, et al.** 2008. Advances in CO<sub>2</sub> capture technology—The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2: 9-20.
- Glarborg, P., A. D. Jensen, et al.** 2003. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. *Progress in Energy and Combustion Science* 29: 89-113.
- Graus, W. and e. Worrell** 2011. Methods for calculating CO<sub>2</sub> intensity of power generation and consumption: A global perspective. *Energy Policy* 35: 3898-3908.
- Gupta, R.** 2007. *Advanced Coal Characterization: A Review*. *Energy & Fuels* 21: 451-460.
- Kelemen, s. R., M. L. Gorbaty, et al.** 1991. Surface Composition of Iron and Inorganic Sulfur Forms in Argonne Premium Coals by X-ray Photoelectron Spectroscopy. *Energy & Fuels* 5: 720-723.
- Liu, P., M. C. Georgiadis, et al.** 2010. *Advances in Energy Systems Engineering*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*: null-null.
- Liu, X., M. Xu, et al.** 2007. Effect of Combustion Parameters on the Emission and Chemical Composition of Particulate Matter during Coal Combustion. *Energy & Fuels* 21: 157-162.
- Mastral, A. M., M. s. Callén, et al.** 1999. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organic Matter Associated to Particulate matter Emitted from Atmospheric Fluidized Bed Coal Combustion. *Environmental Science & Technology* 33: 3177-3184.
- Matsuoka, K., A. Abe, et al.** 2001. Suppression of SO<sub>2</sub> Emission during Coal Oxidation with Calcium Loaded by Hydrothermal or Hydration Treatment. *Energy & Fuels* 15: 648-652.
- normann, F., K. Andersson, et al.** 2009. Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process. *Progress in Energy and Combustion Science* 35: 385-397.
- normann, F., K. Andersson, et al.** 2008. High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxy-fuel combustion. *Fuel* 87: 3579-3585.
- Park, J., J. s. Park, et al.** 2006. NO Emission Behavior in Oxy-fuel Combustion Recirculated with Carbon Dioxide. *Energy & Fuels* 21(1): 121-129.
- Perry, M. B.** (2004). *Clean Coal Technology*. *Encyclopedia of Energy*. J. C. Cutler. New York, Elsevier: 343-357.
- Rathnam, R. K., L. K. Elliott, et al.** 2009. Differences in reactivity of pulverised coal in air (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) and oxy-fuel (O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) conditions. *Fuel Processing Technology* 90(6): 797-802.
- Ren, Q., C. Zhao, et al.** 2008. Effect of mineral matter on the formation of NOx precursors during biomass pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 85: 447-453.
- Rochelle, G. t.** 2009. Amine Scrubbing for CO<sub>2</sub> Capture. *Science* 325: 1652-1654.
- sánchez, A., e. eddings, et al.** 2010. Fourier Transform Infrared (FTIR) Online Monitoring of NO, N<sub>2</sub>O, and CO<sub>2</sub> during Oxygen-Enriched Combustion of Carbonaceous Materials. *Energy & Fuels* 24: 4849-4853.
- seepana, s. and s. Jayanti** 2010. Steam-moderated oxy-fuel combustion. *Energy Conversion and Management* 51: 1981-1988.
- thomas, K. M.** 1997. The release of nitrogen oxides during char combustion. *Fuel* 76(6): 457-473.
- toftgaard, M. B., J. Brix, et al.** 2010. Oxy-fuel combustion of solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 36(5): 581-625.
- Valentim, B., M. J. L. d. souza, et al.** 2006. Combustion studies in a fluidized bed - The link between temperature, NOx and N<sub>2</sub>O formation, char morphology and coal type. *International Journal of Coal Geology* 67: 191-201.
- Wall, t., Y. Liu, et al.** 2009. An overview on oxyfuel coal combustion-State of the art research and technology development. *Chemical Engineering Research and Design* 87(8): 1003-1016.
- Wall, t. F.** 2007. Combustion processes for carbon capture. *Proceedings of the Combustion Institute* 31: 31-47. [www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov). (2010). "<http://www.eia.doe.gov/cabs/Colombia/Full.html>." Retrieved 01/12/11.
- Zhang, L., e. Binner, et al.** 2010. High-Speed Camera Observation of Coal Combustion in Air and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Mixtures and Measurement of Burning Coal Particle Velocity. *Energy & Fuels* 24(1): 29-37.
- Zhu, J., Q. Lu, et al.** 2009. NO emission on pulverized coal combustion in high temperature air from circulating fluidized bed – An experimental study. *Fuel Processing Technology* 90: 664-670.

Recibido: Noviembre 2 de 2011.

Aceptado para su publicación: Marzo 2 de 2012.