

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXIII

DICIEMBRE DE 2009

NÚMERO 129

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO



CONTENIDO - CONTENTS

Pág.	Pág.
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)	
A Review of Expansive Phenomena in Wagenburg North Tunnel [Una revisión de los fenómenos expansivos en el Túnel Wagenburg Norte] <i>Iván Berdugo, Eduardo Alonso, Enrique Romero, Antonio Gens & María Albis</i> 455	
Un cuello volcánico en el borde llanero [A volcanic neck in the llanos border] <i>Jaime Galvis Vergara & Diego Mojica Corchuelo</i> 469	
El periodo cálido medieval y la pequeña edad de hielo en el neotrópico [The medieval warm period and the little ice age in the neotropics] <i>Yuri Carolina García Castro & José Ignacio Martínez</i> 477	
La historia Cenozoica del fenómeno de El Niño [The Cenozoic History of El Niño Phenomenon] <i>José Ignacio Martínez</i> 491	
Cimentación de la fórmula empírica de Ångström referente a la radiación atmosférica en superficie [A groundwork for Ångström's empirical formula for the downwelling longwave radiation] <i>Joaquín Pelkowski</i> 513	
Física (Physics)	
Evaluación de calidad por Espectroscopía Raman y Microscopía de Fuerza Atómica de películas de diamante crecidas por Hot Filament-cvd [Hot Filament-cvd grown diamond film quality evaluation by Raman Spectroscopy and Atomic Force Microscopy] <i>Wayner Rivera, Alfonso Devia & José Pérez</i> 529	
Química (Chemistry)	
Síntesis de Hidrogeles a partir de Acrilamida y Ácido Alilmalónico y su utilización en la liberación controlada de fármacos [Synthesis of Hydrogels based on Acrylamide and Allylmalonic Acid and their use in drugs controlled delivery] <i>Gustavo A. Muñoz & Fabio Zuluaga</i> 539	
Caracterización física y matemática de péptidos de alta unión de msa-2. Aplicación de la teoría de la probabilidad y la entropía [Physical and mathematical characterization of high binding peptides from msa-2. Application of the probability theory and entropy] <i>Javier Rodríguez, Catalina Correa, Signed Prieto, Diana Cardona, Sarith Vitery, Germán Puerta, Yolanda Soracipa & Pedro Bernal</i> 549	
Historia de la Ciencia (History of Science)	
Análisis crítico del Principio de Uniformismo en Geología, desde la Teoría del Conocimiento del filósofo Karl Raimund Popper [Critical Analysis of the Principle of Uniformitarianism in Geology, from the Theory of the Knowledge of the Philosopher Karl Raimund Popper] <i>Jesús Antonio Manrique Mantilla</i> 559	
Vida Académica (Academic Life) 575	
Índice General del Volumen XXXIII, año 2009 (General Index of Volume XXXIII, year 2009) 589	
Índice de Autores (Index of Authors) 591	
Constitución de la Academia (Members of the Academy) 593	
Publicaciones de la Academia (Publications of the Academy) 595	

A REVIEW OF EXPANSIVE PHENOMENA IN WAGENBURG NORTH TUNNEL

Por

Iván Berdugo¹, Eduardo Alonso², Enrique Romero², Antonio Gens², María Albis³

Abstract

Berdugo I., E. Alonso, E. Romero, A. Gens & M. Albis: A Review of Expansive Phenomena in Wagenburg North Tunnel. *Rev. Acad. Col. Cienc. Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **33** (129): 455-468, 2009. ISSN 0370-3908.

The paper deals on tunnelling and swelling in anhydritic-gypsiferous claystones. The geology of the *Gipskeuper* in Baden-Württemberg (Germany) and the phenomenology of expansions in Wagenburg North tunnel are described. Consistent swelling triggering events, mechanisms and exhaustion causes were identified using a thermo-hydro-chemo-mechanical theoretical analysis. It is suggested that long-term swelling in tunnels excavated through anhydritic-gypsiferous claystones is a result of solvent-way gypsum crystal growth due to ventilation induced groundwater evaporation and rock drying; an opposite concept to the usual consequences of drying in argillaceous materials, which causes shrinkage strains.

Key words: anhydrite, gypsum, clay, rock, tunnel, swelling, ventilation.

Resumen

El artículo trata sobre construcción de túneles y expansividad en arcillolitas anhídritico-yesíferas. Se describe la geología del *Gipskeuper* en Baden-Württemberg (Alemania) y la fenomenología de las expansiones en el túnel Wagenburg Norte. La identificación de los eventos detonantes de las expansiones -así como de los mecanismos y causas de su decaimiento-, se fundamentó en un análisis teórico termo-hidro-químico-mecánico. Se sugiere que las expansiones a largo plazo en túneles excavados en arcillolitas anhídritico-yesíferas es el resultado del crecimiento vía solvente de cristales de yeso por causa de la evaporación del agua del terreno y la desecación de las rocas, ambas inducidas por la ventilación; un concepto opuesto a las consecuencias usuales del secado de los materiales arcillosos, el cual causa deformaciones de contracción.

Palabras clave: anhídrita, yeso, arcilla, roca, túnel, expansividad, ventilación.

1 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental – Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Correo electrónico: irberdugo@uninorte.edu.co

2 Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica – Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Correo electrónico: eduardo.alonso@upc.edu; enrique.romero-morales@upc.edu; antonio.gens@upc.edu

3 Programa de Ingeniería Civil – Universidad de La Salle, Bogotá, D.C. Colombia. Correo electrónico: malbis@unisalle.edu.co

Introduction

A large amount of tunnels in Baden-Württemberg (Southwestern Germany) are located in outcrops and buried formations from the Keuper (Triassic - Germanic Basin). Expansive phenomena have been observed in some of these tunnels, specifically in stretches excavated through anhydritic-gypsiferous claystones from the *Mittlerer Gipschizont* (*Gipskeuper*, Middle Keuper); a situation that is clearly illustrated in table 1, which indicates the location of roadway and railway tunnels within the Keuper. The swelling behavior of the *Mittlerer Gipschizont* has caused high heave in unconfined tunnel floors and strong swelling pressure against inverts of tunnels with resisting supports. Recurrent damages and failures in both drainage systems and concrete flat-slabs and invert-arches have been necessary continuous repair measures and reinforcements.

The swelling potential of the *Gipskeuper* in general- and the *Mittlerer Gipschizont* in particular-, has been studied during decades in Germany since expansive phenomena were detected in Weinsberger tunnel, Kappesberg tunnel and Schanz tunnel at the end of the 19th century. Swelling induced rock deformation patterns in these cases were described in detail by **Binder (1864)** and **Schachterle (1926, 1929)**. Later, precise information on swelling-time relationships came from long-term measurements of heaves and swelling pressures carried out in the Wagenburg Tunnel System during different periods since 1943 until 1992 (**Krause & Wurm, 1975; Krause, 1976; Wichter, 1985; Nagel, 1986; Paul & Wichter, 1996; Paul & Walter, 2004**), in the test gallery of Freudenstein tunnel between 1987 and 1998 (**Kirschke, 1987; Fecker, 1992; Wittke-Gattermann, 1998; Amstad & Kovári, 2001**), in the test zone of Heschlach II tunnel between 1987 and 1988 (**Wittke, 2000**) and in their operative tube between 1991 and 2003 (**Wittke, 2006**). In all of these cases heaves and swelling pressures evolved at high rates and without signs of attenuation.

Since the comprehensive studies on swelling of sulphate-bearing rocks were published by **Sabores (1962)** it has been generally accepted that two uncoupled mechanisms occur when anhydritic-gypsiferous claystones are soaked: (i) a short term "physical swelling"-due to the expansion of clay host matrix-, and (ii) a long term "chemical swelling"-due to the transformation of anhydrite into gypsum in an thermodynamically open system, with a volumetric increase of approximately 62%, as shown in figure 1. If the volumetric increase is partial or totally inhibited in either of these mechanisms, then a corresponding swelling pressure is generated. From that time this criterion -usually called "the anhydritic theory"-, is the key referent of

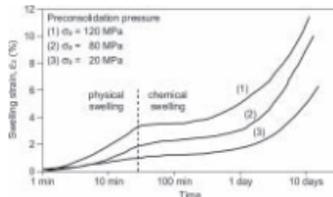


Figure 1. Classic interpretation of swelling mechanisms in anhydritic-gypsiferous claystones presented on an original figure by Smolczyk (1992).

geological and geotechnical studies of the *Gipskeuper* developed in Germany.

The investigations by **Schlenker (1971)** and **Lippmann (1976)** focused on the quantitative mineralogical composition of the *Gipskeuper* host matrix revealed the occurrence high contents of interstratified expansive clayey minerals. On the other hand, the studies by **Rauh & Thuro (2006)** and **Rauh et al. (2006)** showed the dependence of the anhydrite swelling potential on their textural form, emphasizing the importance of the surface available to interact with water on the swelling mechanisms of this type of rock. With regard to laboratory tests, long-term expansions without signs of attenuation can be observed in both free swelling tests and swelling pressure tests on undisturbed samples recovered from the *Gipskeuper* in Wagenburg tunnel (**Henke, 1976**) and in the test gallery of Freudenstein tunnel (**Kirschke, 1987; Kirschke et al., 1991**), as shown in figure 2. Similar results are reported by **Pimentel (1996)**, who used a protocol of swelling under loading on undisturbed samples from the *Gipskeuper*.

Nowadays certainly there is an elevated knowledge on the mineralogical composition of the *Gipskeuper* and on the phenomenology of their swelling behavior. However, this situation is not in agreement with the understanding of the mechanisms behind the swelling. The "physical swelling" of anhydritic-gypsiferous claystones occurs even in the absence of active clay minerals and is characterized by asymptotic swelling-time relationships due to it controlled by suction changes until saturation (**Alonso & Berdugo, 2005**). However, theoretical considerations and experimental evidences indicate that the transformation of anhydrite into gypsum is a highly time-consuming isovolumetric process in which anhydrite is dissolved as fast as secondary gypsum precipitates (e.g. **Holliday, 1970**;

Table 1. Tunnels in Baden-Württemberg excavated through rocks from the Keuper according to Krause (1976), Wichter (2000) and Amstad & Kovári (2001).

TUNNEL	Excavated rocks		Stage	Upper Keuper	Middle Keuper	Lower Keuper	Tunnel Type	Tunnel Length (km)	Tunnel affected by expansive phenomena						
	Formation	Member							A	B	C				
Upper Keuper	Althausen	Althausen	III				B	0.5	1.3	2.1	0.2	0.3	0.6	0.3	0.3
	Ullrich	Ullrich	III				B								
	Wagenburg	Wagenburg	III				B								
	Wagenburg	Wagenburg	III				B								
	Wagenburg	Wagenburg	III				B								
	Wagenburg	Wagenburg	III				B								
	Wagenburg	Wagenburg	III				B								
	Wagenburg	Wagenburg	III				B								
	Wagenburg	Wagenburg	III				B								
	Wagenburg	Wagenburg	III				B								
Middle Keuper	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
	Freudenstein	Freudenstein	II				B								
Lower Keuper	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								
	Wagenburg	Wagenburg	I				B								

A: roadway tunnel, B: railway tunnel, C: test tunnel, E: stretches affected by expansive phenomena.

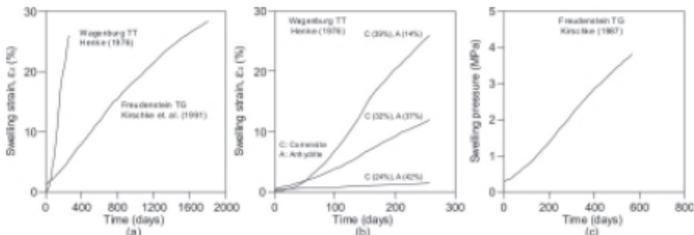


Figure 2. Swelling tests on undisturbed samples recovered from the *Gipskeuper* in Wagenburg tunnel and Freudenstein tunnel.

Ortiz, 1977; Pina et al., 2000; Pimentel, 2003; Berdugo, 2007). The excess in hydrated calcium sulphate (62% in volume) could be either transported in aqueous solution or it could precipitate partially in the form of gypsum in open discontinuities of the host clayey rock. So, the classic criterion on long-term "chemical swelling" of anhydritic-gypsiferous claystones is difficult to accept and more realistic mechanisms must be considered.

This paper is a contribution to the study of mechanisms underlying long-term expansive phenomena affecting tunnels excavated through anhydritic-gypsiferous claystones, which uses a case from Baden-Württemberg as reference. Main compositional features of the *Gipskeuper* are summarized and the phenomenology of expansions in the tunnel is described. The swelling in the tunnel is analyzed as a thermo-hydro-chemo-mechanical (THCM) phenomenon using a theoretical framework founded on basic geochemical and thermodynamic principles, making it possible the formulation of consistent triggering swelling events as well as the identification of conditions conducing to either their evolution or exhaustion.

The *Gipskeuper*

Rocks in the Triassic Germanic Basin have been conventionally divided into three typical series: Bunter,

Muschelkalk and Keuper; but only in the latest two of these series anhydritic-gypsiferous claystones occur systematically. A representative stratigraphic profile of the Keuper in Baden-Württemberg is presented in figure 3.

At the end of the Muschelkalk sedimentation within the Germanic Basin descended, so the Keuper sediments were deposited in wide flat areas. The basement received sediments from sea currents, rivers and deltas, wind, processes of evaporation and flash floods. At this time the climate was continental and arid, but changed to semi-humid conditions until the end of the Keuper (Geyer & Gwinner, 1991). The *Gipskeuper* (Middle Keuper) is a sequence of clays and silt to dolomitic marls showing a wide range of colors. Red to violet sediments are indicative of an oxidizing environment while gray to greenish sediments are the confirmation of a reducing environment. Evaporation of the saline sea water led to the formation of anhydrite, gypsum and halite crystals (Aigner, 1990).

In general, the *Gipskeuper* consists in heterogeneous mixtures of anhydrite and gypsum in a hard clayey matrix, as shown in figure 4 and table 2. Expansive clays are partial components of host clayey matrix; for example, Corrensite has been found in Baden-Württemberg (Schlenker, 1971; Götz, 1972; Henke, 1976; Lippmann, 1976) as illustrated figure 5-. Corrensite is a 1:1 regular interstratification of

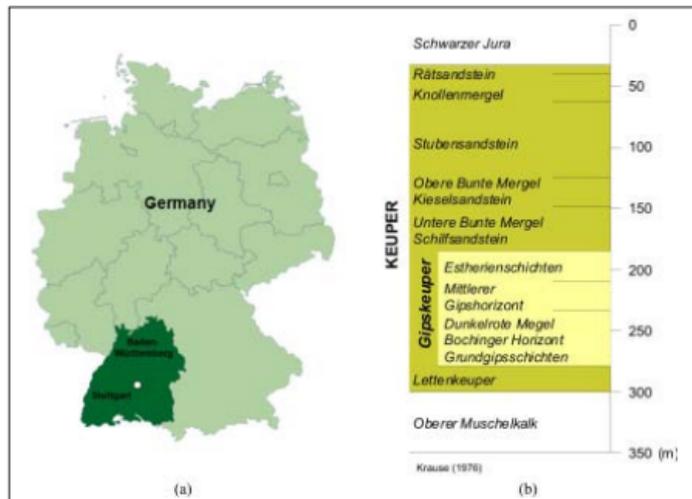


Figure 3. (a) location of the zone under study, (b) stratigraphic profile of the Keuper in Baden-Württemberg.



Figure 4. Undisturbed sample from the *Gipskeuper* (Amstad & Kovári, 2001).

trioctahedral chlorite and trioctahedral smectite, also called "swelling chlorite". However, Illite and Chlorite dominate the clay fraction in Triassic anhydritic-gypsiferous claystones and non-expansive clays have been detected as principal clay matrix components in many tunnels excavated through the the *Gipskeuper*; for example, Kappelberg (Krause, 1976; Kurz & Spang, 1984) and Freudenstein (Kirschke, 1987; Kirschke et al., 1991).

In Baden-Württemberg the *Gipskeuper* shows a constant profile which can be divided, basically, as follows (see figure 5): the *Grundgipschichten* (basal gypsum layers), *Bochinger Horizont* (Bochinger bed), *Dunkelrote Mergel* (dark red marls), *Mittlerer Gipschizont* (middle gypsum bed) and *Estherienschiefer* (Estheria beds). In Stuttgart a distinction must be made between two different layers associated with the *Mittlerer Gipschizont*: (i) the leached gypsiferous level, and (ii) the unleached anhydritic

Table 2. Mean composition and physical properties of the *Gipskeuper* (several sources).

Anh	Mineralogical composition (%)					Gs	w (%)	pt (Mg/m ³)
	Gyp	C	Carb	Qtz	Feld			
30-75	1-20	5-20	0-20	5-20	1-5	2.60-2.84	0.5-4.5	2.2-2.4

Ash: anhydrite, Gyp: gypsum, C: clay, Carb: carbonate, Qtz: quartz, Feld: feldspar.

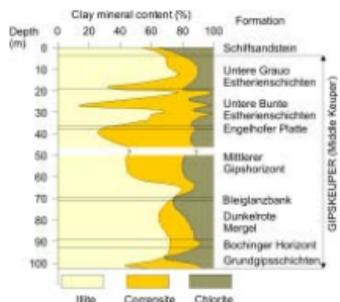


Figure 5. Lithology and composition of clayey matrix of the Gipskeuper in Baden-Württemberg (modified after Schlenker, 1971).

level. This distinction is illustrated in figure 6 using the case of Wagenburg North tunnel as reference. Above the anhydritic level anhydrite has been converted into gypsum in geological times; whereas above the gypsiferous level gypsum has been dissolved and transported away by the groundwater (Wittke, 2000).

Information regarding the chemical composition of groundwater in tunnels excavated in the the *Gipskeuper* in Baden-Württemberg is either incomplete or inconclusive. According to Krause (1976) for existing tunnels in the Keuper the total discharge varies between 0.5 and 2 litres per second and the sulphate content in groundwater near the leached gypsiferous level is above 1000 ppm. Data on groundwater sulphate content in tunnels have been reported by some authors, but only concerning the possibility of sulphate attack to concrete. The occurrence of macroconstituents as calcium, magnesium, sodium and potassium -which have an essential role in the interaction

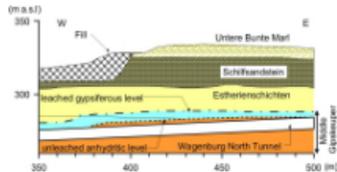


Figure 6. The leaching front (gypsiferous level) and the anhydritic level in Wagenburg North tunnel (Stuttgart, Baden-Württemberg). Original figure modified after Nagel (1986), Paul & Wichter (1996) and Amstad & Kovári (2001).

between sulphate-rich water and sulphate-bearing rocks, is not reported in the German literature on the subject. Values of sulphate content reported by some authors are presented in table 3.

The Wagenburg North tunnel

The Wagenburg tunnel connects the centre with the eastern part of Stuttgart. Three independent structures must be distinguished in this case; each one characterized by particular cross sections, but affected by similar expansive phenomena (see figure 7): (i) the North tunnel, (ii) the South tunnel, and (iii) the Test tunnels. These structures are located mainly within the *Mittlerer Gipskeuper* and strong swelling is restricted to the innermost 250 m, just in the zone in which the tunnels cross the transition from the leached gypsiferous level to the unleached anhydritic level (see figure 8). Unfortunately, information on the hydrogeological regime in the rock massif is unknown.

The north tunnel was completed in 1942. It has a length of 800 m and a maximum overburden near 80. It has a horseshoe cross-section and a concrete lining that covers the roof and walls, but the floor was unlined and has remained in this state ever since construction (Götz, 1972). Expansive phenomena measured since 1943 until 1970 were

Table 3. Sulphate content in groundwater from some tunnels excavated in the *Gipskeuper*.

Tunnel	SO ₄ concentration (ppm)	Reference
Weinberg tunnel	up to 1500	Grenningner & Spang (1978)
Kappelsberg tunnel	1957 - 2755	Krause & Warm (1975)
Freudenstein tunnel	up to 5600	Berner (1991)
Engelberg Base tunnel	> 8600	Kühnlein et al. (1979)

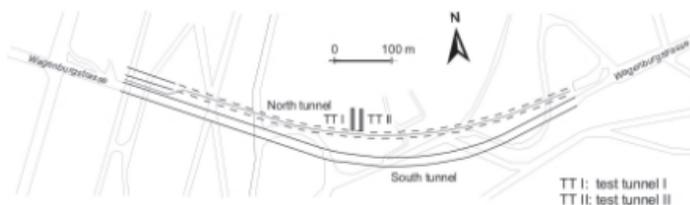


Figure 7. Localization of structures in Wagenburg tunnel system.

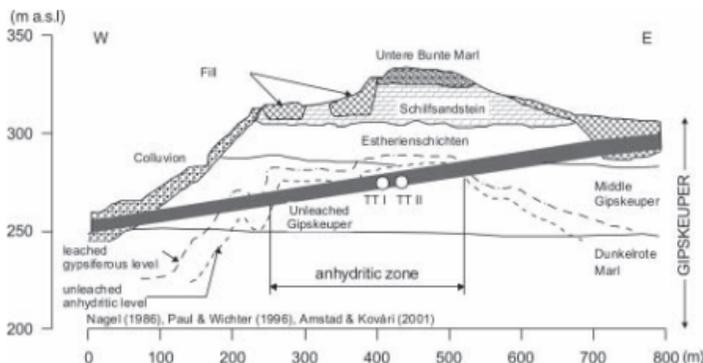


Figure 8. Geological longitudinal section of Wagenburg Tunnel System.

described in detail by several authors (e.g. Götz, 1972; Krause, 1976 and Nagel, 1986). The evolution of floor heave in this tunnel was analyzed for this paper using original data by Krause (1976) and Nagel (1986), and is presented in figure 9. After twenty seven years of monitoring since 1943 a maximum floor heave of 1029 mm was measured in the axis of the section and, in general, no asymptotic trends were observed in any of the control stations (see figure 9c).

Weathering and gypsum growth induced swelling certainly affected the foundation material in Wagenburg north tunnel, as illustrated in figure 10. Krause (1976) reported that "...inspections of foundation materials in Wagenburg during the early 70's -and also in Kappelberg tunnel-, have shown that the original anhydrite was converted almost completely to gypsum in the heaving floors without showing any visible increase in volume. Except for strongly leached sections, the sulphate rocks have remained essentially compact".

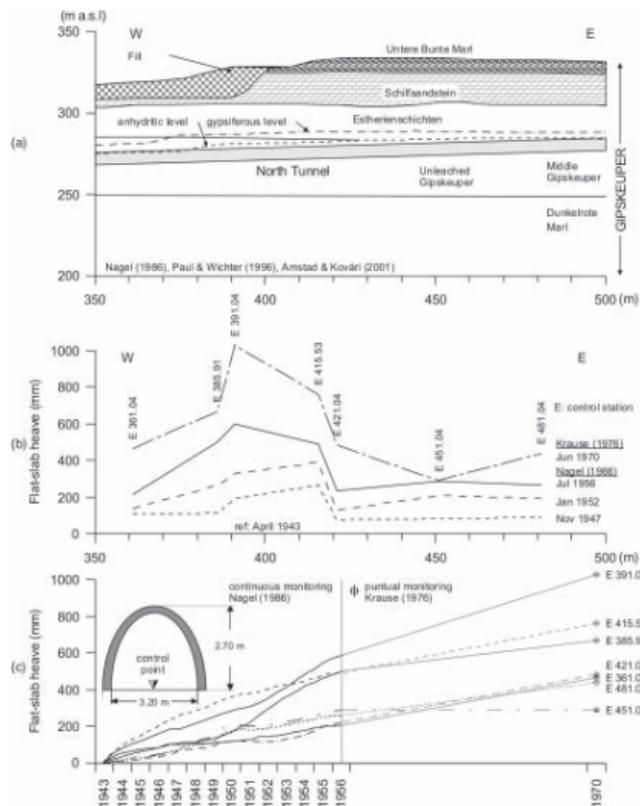


Figure 9. Geology and total floor heave in Wagenburg north tunnel after 27 years of monitoring (modified after Krause, 1976 and Nagel, 1986).

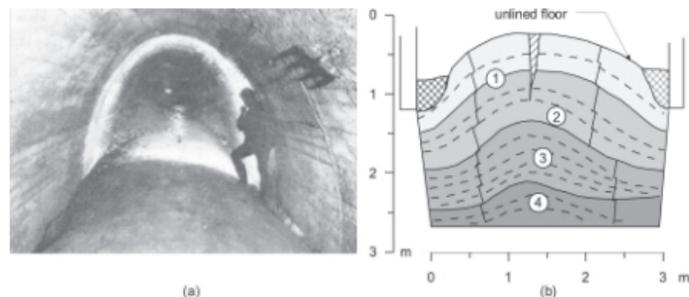


Figure 10. (a) Wagenburg north tunnel in 1970 in an image by Spain (1974). (b) Distribution of gypsum crystals along the weathered subsoil profile according to Krause (1977) & Nagel (1986): (1) segregate-impure gypsum crystals and macrocrystals, (2) segregate-pure gypsum crystals in fine sheets, (3) gypsum macrocrystals and fibrous gypsum, (4) transition between (1) and (2).

Analysis of swelling mechanisms

Background

Observations by **Krause (1976)** in Wagenburg North tunnel reveal that transformation of anhydrite into gypsum is not a reasonable explanation for long-term expansive phenomena that affected the foundation material. In fact, these observations are unequivocal evidences of the epitaxial growth of gypsum on anhydrite; a process that generates a gypsum film protecting the anhydrite from the water action (**Orti, 1977; Pina et al., 2000; Berdugo, 2007**).

In opinion of **Wittke & Rißler (1976)** and **Wittke & Pierau (1979)** the water supplied by the natural ventilation was the triggering event for expansive phenomena that affected Wagenburg North tunnel. These authors indicate that during the warm period and just after construction the air flowing into the tunnel -with a water vapour concentration between 8 and 15 g/m³-, provided to the unlined floor approximately 6 to 10 m³ of water daily and caused both the weathering and the swelling of the rock (see figure 11). Therefore, a mechanism of "physical swelling" of the clayey matrix is defined as triggering event for expansions.

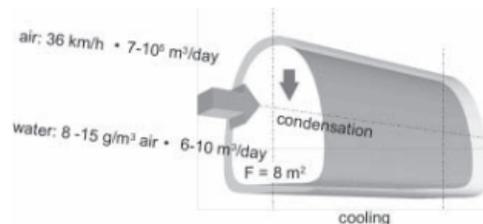


Figure 11. Possible quantity of condensation water as a consequence of natural ventilation in Wagenburg North Tunnel (modified after Wittke & Pierau, 1979).

The hypothesis of Wittke and co-workers was discussed by Pimentel (2003) as follows: *«In the past it was incorrectly assumed by Wittke & Rissler (1976), that during the driving of a tunnel and before lining, the swelling process will be activated on the surfaces exposed to air circulation with high but not saturated relative humidity. This concept does not consider unloading and gravitation. On the other hand, exposed clayey rock will be in contact with circulating wet air, although it's hygroscopic property, dry out and shrink but not swell. The circulating air will evaporate the free water and some molecules in the diffuse layer of the exposed surfaces. Due to this evaporation, the salinity in the diffuse layer will increase and the thickness of the diffuse layer will shrink losing water molecules to the free water, which will be also evaporated. Additionally, it must be considered that due to unloading, shrinkage of the diffuse layer and due to the surface tension of water, negative pore pressure will be generated, producing water meniscus and tensile stresses. This tensile stresses can open some latent cracks. In summary, the exposition of rock surfaces with wet air with relative humidity less than 90% will contribute to a weathering process but not activate a swelling process.»*

The criteria by Wittke and Pimentel are correct, but only partially. As shows figure 10b weathering and swelling certainly affected the foundation material of Wagenburg North tunnel, but in a more complex form than only due to condensation or evaporation of pure water. The growth of gypsum crystals in discontinuities and fissures of the expanded rock is an unequivocal indicator of rock weathering and swelling in the presence of calcium sulphate-rich water. Then, it is reasonable to assume that the swelling that affected the rock was related, almost partially, with gypsum crystal growth; but as a consequence of other mechanisms than just the anhydrite gypsification suggested by the "anhydritic theory".

Theoretical THCM analysis

Realistic mechanisms associated with the expansive phenomena observed in Wagenburg North tunnel can be formulated if the tunneling induced rock damage, drainage and ventilation are properly taking into account.

It is suggested that the tunnel excavation caused a damaged zone below the unsealed floor consisting in discontinuities along sedimentation planes and fissures - which is a typical effect of stress relief in underground excavations-. Below the damaged zone the rock can be considered nearly waterproof. In addition, tunnelling generated seepage of groundwater from the leached gypsiferous level located in the overburden, which drained

naturally and was concentrated due to gravity in damaged zone. The leached gypsiferous level is a weathered material formed by anhydrite dissolution; therefore, it is reasonable to assume that high contents of calcium (Ca²⁺) and sulphate (SO₄²⁻) are dissolved in the groundwater. Finally, tunnelling make it possible the interaction of the environment imposed by the natural ventilation -namely, relative humidity, temperature and wind velocity-, with the damaged rock causing either wetting or drying due to vapour transfer.

Vapour transfer from the groundwater to the tunnel, or vice versa, depends on the difference between the relative humidities imposed by the ventilation and the aqueous system. In this sense, the transfer occurs in the direction of the media with the lower relative humidity at rates regulated by the temperature and the wind velocity.

Vapour transfer in Wagenburg North tunnel was evaluated for this paper using data on extreme values for the vapour density suggested by Wittke & Pierau (1979). The partial pressure of vapour (u_v) was calculated using the law of ideal gases (Eq. 1), assuming constant vapour densities of 0.008 and 0.015 kg/m³ in the temperature range between 20 and 40°C (see figure 11). On the other hand, the vapour pressure imposed by pure water at atmospheric pressure was calculated using (Eq. 2). In these conditions a theoretical dependence of the relative humidity (u_v/u_v) on the temperature in the tunnel was obtained. So, the tunnel was assumed to be an ideal thermodynamically closed system. Due to the chemical composition of groundwater in the tunnel is unknown, characteristic values of relative humidity imposed by saturated sulphate solutions have been used as representative of the in situ conditions (see figure 12a).

$$u_v = \frac{\rho_v \cdot RT}{M_w \cdot (T+273.15)} [Pa] \quad (Eq. 1)$$

u_v: partial pressure of vapour

ρ_v: vapour density [kg/m³]

R: universal gas constant (8.314 J mol⁻¹ T⁻¹)

T: (°C)

M_w: molecular mass of water (0.018 kg mol⁻¹);

$$u_{v,s} = 136075 \times 10^6 \cdot e^{\frac{-4299.7}{T+273.15}} [Pa] \quad (Eq. 2)$$

T: (°C)

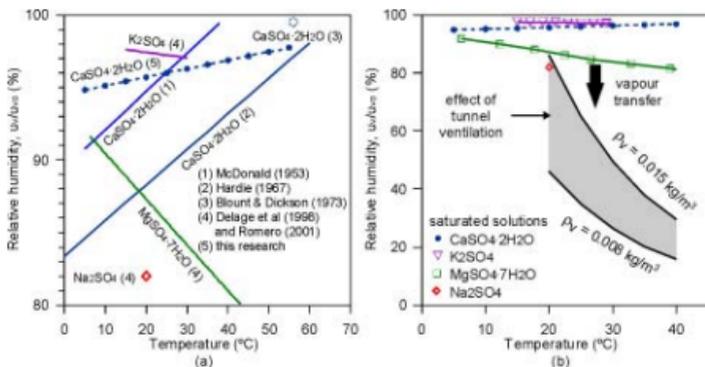


Figure 12. Analysis of vapour transfer for Wagenburg north tunnel based on relative humidities imposed by saturated sulphate solutions and values of vapour density suggested by Wittke & Pierau (1979).

The results of this analysis are presented in figure 12b. It is clear that if an ideal thermodynamically closed system holds for Wagenburg North tunnel, the relative humidity of the incoming flow of wet air is lower than the relative humidity in equilibrium with ideal saturated-sulphate solutions within a wide temperature range representative of the tunnel operation. Therefore, theoretically the vapour transfer could be only possible from the sulphate-rich groundwater accumulated in the damaged zone towards the tunnel through the unsealed floor, causing groundwater evaporation and rock drying, just in opposition to the hypothesis by Wittke and co-workers.

Evaporation is a two-step process that consists in a first step involving the transition from liquid to vapour phase at the liquid-vapor interface (vaporization); followed by a second step of vapour transport from the high concentration area at the evaporating surface to the low concentration area of the ambient air.

The evaporation of calcium sulphate-rich water unconditionally leads to high concentrations of dissolved calcium (Ca²⁺) and sulphate (SO₄²⁻). This could be the triggering event of both the supersaturation in these species of the groundwater and the precipitation of gypsum crystals in open discontinuities and fissures of the damaged zone.

Therefore, the long-term swelling of the foundation material in Wagenburg North tunnel could be related with a mechanism of solvent-water gypsum crystal growth, which evolved systematically due to an effective vapour transfer from the groundwater to the tunnel atmosphere in a weathered or damaged rock affected by the excavation works. At first, this interpretation is in agreement with the occurrence of gypsum crystals on the unsealed anhydrite of the foundation material of the tunnel.

Discussion

In reality, ideal thermodynamical closed conditions do not occur in tunnels, as it was assumed in the analysis presented here. Erratic variations of the environmental relative humidity imposed by ventilation -without a clear dependence on temperature, even during the same season-, have been observed in several tunnels from different climatic zones. For example: Orange-Fish tunnel in South Africa, excavated through carboniferous expansive mudrocks from the Permian Beaufort formation (Olivier, 1987); Tourenmire tunnel in France, excavated through Jurassic claystones and marls (Rejeb & Cabrera, 2006); ECRB cross drift of Yucca Mountain in USA, excavated through Tertiary ignimbrites (Ghezzehei et al., 2004); and

Lilla tunnel in Spain, excavated through Triassic anhydritic-gypsiferous claystones from the Lower Ebro Basin (Berdugo, 2007). Nevertheless, measurements in these tunnels indicate that relative humidity due to ventilation is usually below 70%, with seasonal variations that also affect the temperature and both the wind velocity and the wind direction. These values are sufficient to cause the evaporation of groundwater.

When drying in the presence of poorly mineralized groundwater shrinkage of clayey rocks occur due to a loss of water mass without an effective transfer of solute mass. On the contrary, in the presence of highly mineralized groundwater an important precipitation of salts is possible and swelling due to crystal growth takes place.

The systematic solvent-way gypsum crystal growth explains the evolution of long-term swelling of anhydritic-gypsiferous claystones without a clear limit. On the other hand, the eventual exhaustion of this swelling mechanism would be related with exhaustion of the water supply from the tunnel overburden, changes in the chemical composition of groundwater, seasonal changes in tunnel ventilation -including variations in the wind velocity-, self sealing of fissures, and local instabilities within the damaged zone as a result of rock degradation by wet vapour flow.

Conclusive remarks

Lessons learned from Wagenburg North tunnel indicate that the presence of anhydrite does not unconditionally leads to the development of expansive phenomena in tunnels, showing the shortcomings of the classic "anhydritic theory" on swelling of anhydritic-gypsiferous claystones. Mechanical and hydraulic boundary conditions are important to interpret the phenomenology of long-term swelling in tunnels excavated through these materials; nevertheless, the role played by ventilation in the presence of highly sulphate groundwater should be properly considered in the study of triggering and exhausting events.

A thermo-hydro-chemo-mechanical (THCM) criterion for the interpretation of tunnelling induced swelling in anhydritic-gypsiferous claystones was presented. It is suggested that the occurrence of relict or induced discontinuities in the rock mass, a highly sulphated groundwater and the tunnel ventilation are indispensable requirements for generation of strong long-term swelling.

Experience indicates that tunnelling causes rock damage due to unloading, as well as wetting/drying cycles due to groundwater flow and ventilation. So, tunnels play the double role of permanent source-sink for liquid and gaseous phases.

Ventilation imposing relative humidities below the characteristics values for calcium sulphate-rich water causes a series of processes: (i) vapour transfer from the groundwater accumulated in the damaged zone towards the tunnel environment, (ii) rock drying, (iii) supersaturation in gypsum of the aqueous system, and (iv) precipitation/crystallization of gypsum in discontinuities and fissures of the damaged zone. As a result of gypsum crystal growth rock swelling occur, evolving at high rates if an effective vapour transfer from the groundwater to the tunnel atmosphere is permitted and rock discontinuities remain open.

Following the considerations presented above, it is suggested that swelling induced by gypsum growth in tunnels excavated through anhydritic-gypsiferous claystones is mainly a consequence of drying; an opposite concept to the usual consequences of drying in argillaceous materials, which result in the development of shrinkage strains. This understanding seems to be consistent with observations in Wagenburg North tunnel.

Finally, it should be added that mechanisms behind expansive phenomena in anhydritic-gypsiferous claystones cannot be fully identified at the scale of laboratory experiments. The field scale is unconditionally needed to understand the relevant processes.

Acknowledgements

The Spanish Ministry for Infrastructures was the financial supporter for this research (Research Project "Criteria for the Design and Construction of Tunnels in Gypsum Rocks", Ref. C 24/2006). The authors wish to thank the following colleagues for their collegues Prof. Dr. Ing. Lucía Candelas-Lleó, Prof. Dr. Ing. Marcos Arroyo-Álvarez de Toledo, Prof. Dr. Ing. Maarten Saalink and Dr. Ing. Juliana Knobeldorff.

References

Aigner, T. (1990). Stratigraphic modelling of epicontinental basins: two examples. *Sediment. Geol.*, **69**: 167-190.

Alonso, E.E. & Berdugo L.R. (2005). Expansive behaviour of sulphate-bearing clays. *Keynote Paper*. Proceedings of International Conference on Problematic Soils, Famagusta, N. Cyprus. Biluel & Nalantola (eds), Eastern Mediterranean University Press: 477-498.

Amstad, C. & Kovari, K. (2001). Untertagebau in quellfähigen Böden. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) & Bundesamt für Strassen (ASTRA). Zürich.

Binder, C. (1864). Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg, Jahrgang 20.

Berdugo, I.R. (2007). Tunnelling in sulphate-bearing rocks - expansive phenomena. De. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.

Berner D. (1991). Die Geologie des Freudensteintunnels, Ingenieurbauwerke, DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart, No. 7.

Blount C.W. & Dickson F.W. (1973). Gypsum anhydrite equilibria in systems CaSO₄ and CaCO₃-NaCl-H₂O. *The American Mineralogist*, **58**: 323-331.

Delage, P., Howat, M.D. & Cui, Y.J. (1998). The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology* **50**: 31-48.

Fecker, E. (1992). Untersuchung von schwellvorgängen und erprobung von auskleidungskonzepten beim Freudensteintunnel. Tunnelbau 1996, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Verlag Glückauf GmbH, Essen: 16-20.

Ghezzehei, T.A., Trautz, R.C., Finsterle, S., Cook, P.J. & Ahlers, C.F. (2004). Modeling coupled evaporation and seepage in ventilated cavities. *Vadose Zone Journal*, **3**: 806-818.

Geyer, O.F. & Günner, M.P. (1991). Regional Geology of the State of Baden Württemberg, Germany. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung: Stuttgart.

Güte, H.P. (1972). Zur frage der stollhebungen im Gipskeuper. *Int. Symp. für Untertagebau, Luzern*: 128-132.

Grommlinger G., Spang J. (1978). Instandsetzung des Weinsberger Tunnels. Eisenbahntechnik, Heft 29.

Hardie, L.A. (1967). The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere. *Amer. Mineral.* **52**: 171-200.

Henke, K.F. (1976). Magnitude and rate of heave in tunnels in calcium sulphate bearing rocks. *Bulletin - Association of Engineering Geologists*, **13**: 61-64.

Holliday, D.W. (1970). The petrology of secondary gypsum rocks: a review. *J. Sediment Petrol.* **40**(2): 734-744.

Kirschke, D. (1987). Laboratory and in situ swelling test for the Freudenstein tunnel. *Proc. 6th ICRM, Montreal*, **3**: 1492-1496.

_____, Kovari, K. & Prommersberger, G. (1991). Bemessungsgrundlagen und Konstruktion der Sohle des Freudensteintunnels. Ingenieurbauwerke, DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart, No. 7.

Krause, H. (1976). Sulphate rocks in Baden-Württemberg and their importance in relation to civil engineering. *Bulletin - Association of Engineering Geologists*, **13**: 45-49.

_____, Warm F. (1975). Geologische Grundlagen und Untersuchungen zum Problem der Stollhebungen in Kespertunneln Baden-Württemberg, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 184.

Kühnemann K., Bruder J., Lorscheider W. (1979). Sondierstellen und Probebestehen für den Engelberg-Basistunnel. *Ber. 2. Nat. Tag. Ing.-Geol., Fellbach*.

Kurz, G. & Spang, J. (1984). Instandsetzung und Erneuerung der Blähschlecke des Kappelsbergertunnels. *Bautechnik*, Heft II: 365-376.

Lippmann, E. (1976). Corrosión, a swelling mineral, and its influence on floor heave in tunnels in the Keuper formation. *Bulletin - Association of Engineering Geologists*, **13**: 65-68.

McDonald, G.J.F. (1953). Anhydrite-gypsum equilibrium relations. *American Journal of Science*, vol. 251: 884-898.

Nagel, D. (1986) Stollhebungen in den Keupertunneln von Baden-Württemberg. *Tunnelbau, Kontakt & Studium*, Band **184**: 110-125.

Olivier, J.L. (1987). Some aspects of the influence of mineralogy and moisture redistribution on the weathering behaviour of mudrock. *Proc. 4th Int. Conf. Rock Mech.* **3**: 467-474.

Ortiz, F. (1977). Aproximación al estudio petrográfico de las microestructuras de las rocas de yugo secundario y a su origen. *Revista del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Diputación Provincial de Barcelona*, **32**: 87-152.

Paul, A. & Wichter, L. (1996). Das langzeilverhalten von tunnelbauwerken im quellenden gebirge - neuere messergebnisse vom Stuttgarter Wagenburgstunnel, Taschenbuch für den Tunnelbau, Verlag Glückauf, Essen: 1-15.

_____, & Walter, F. (2004). Measurement of stress changes in rock and rock mass and structures with pressure cells. *Bautechnik* **81**: 639-647.

Pimentel, E. (1996). Quellverhalten diagenetisch verfestigtem Tonstein. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität (TH) Fridericiana in Karlsruhe, Heft 139.

_____, (2003). Swelling behaviour of sedimentary rocks under consideration of microstructural aspects and its consequences on structure design. *Proc. GTMM 2003*, Karlsruhe: 367-374.

Pina, C., Becker, U. & Fernández, L. (2000). Epitaxial growth of gypsum on anhydrite: in situ AFM observations and computer calculations. *Journal of Conference Abstracts 5*: 801. Cambridge Publications: 32-33.

Rejeb A. & Cabrera J. (2006). Time-dependent evolution of the excavation damaged zone in the argil lacunos Tounnein mine (France). *Proc. GEOPROC 2006*, Nanjing: 22-24.

Rauh, F., Spang, G. & Thuro, K. (2006). Assessment of the swelling potential of anhydrite in tunnelling projects. - In: Cuhshaw, M., Reeves, H., Spink, T. & Jefferson, I. (ed.): IAEG Engineering geology for tomorrow's cities. Proceedings of the 10th IAEG International Congress, Nottingham, United Kingdom. Paper number 473, CD-ROM: Tp.

Rauh, F. & Thuro, K. (2006). Why do pure anhydrites differ in their swelling capacity? - 217 S., 3rd Colloquium Rock Mechanics - Theory and Practice. Mitteilungen für Ingenieurgeologie und Geomechanik, Band 7: 191-204.

Romero, E. (2001). Controlled-suction techniques. 4^o Simpósio Brasileiro de Solos São Salvador. W.Y.Y. Gehling & F. Schmidt (eds.): 535-542.

Saunders, J. (1962). Contribution à l'étude des phénomènes mécaniques accompagnant l'hydratation de l'anhydrite. *PhD Thesis*, Université de Toulouse.

Schaechterle K. (1926). Tunnelumlauf in quellendem Gebirge. Die Bautechnik, Heft 30.

- Schaechterle K.** (1929): Die Dichtung und Entwässerung des Schanztunnels bei Fichtenberg. Die Bautechnik, Heft 40.
- Schlenker B.** (1971). Petrographische Untersuchungen am Gipskeuper und Lettenkeuper von Stuttgart, Oberrhein. geol. Abh. Nr. 20.
- Smolczyk, U.** (1992). Discussion on "Physical and mineralogical characterization of a swelling claystone". 7th ICES: 77-78.
- Wichter, L.** (1985). Results of long-term measurement in the Wagenburg tunnel in Stuttgart. Tunnel, 4: 254-257.
- Witke, W. & Ribler, P.** (1976). Bemessung der Auskleidung von Hohlräumen in quellendem Gebirge nach der Finite Element Methode. Veröffentlichung des Inst. für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 2.
- _____ & **Pierau, B.** (1979). Fundamentals for the design and construction of tunnels in swelling rocks. Proc. Int. Cong. on Rock Mechanics, Montreux, 2: 719-729.
- Witke-Gattermann, P.** (1998). Bemessung von Tunneln in quellendem Gebirge. Forum für junge Geotechnik-Ingenieure, 25. Baugrundtagung, Stuttgart.
- Witke, W.** (2000). Stability analysis for tunnels. Verlag Glückauf GmbH, Essen.
- Witke, M.** (2006). Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rocks. Proc Eurock 2006, Van Cotthen, Charlier, Thimus & Tshibangu eds, Taylor & Francis Grup, London: 211-216.

Recibido: enero 28 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2009.

UN CUELLO VOLCÁNICO EN EL BORDE LLANERO

Por

Jaime Galvis Vergara¹, Diego Mojica Corchuelo²

Resumen

Galvis Vergara, J. & D. Mojica Corchuelo: Un cuello volcánico en el borde llanero. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33** (129): 469-475, 2009. ISSN 0370-3908.

Tradicionalmente se ha creído que en la Orinoquia no se presentaron eventos magmáticos durante el Cenozoico. Recientemente, sin embargo han tenido lugar algunos hallazgos en la vertiente de la Cordillera Oriental y el que se presenta en el presente artículo es el primero localizado en el piedemonte. El cuello volcánico de Guamal intruye una secuencia estratigráfica completamente diferente de la Cordillera.

Palabras clave: cuello volcánico, Lahar, Borde Llanero, Cordillera Oriental.

Abstract

Traditionally it has been accepted, that there were not cenozoic magmatic events in the Orinoco basin. Recently, however there have been some discoveries of evidence of that type of events in the slope of the Cordillera Oriental. The one described in this report is the first found in the foothills. The Guamal volcanic neck intrudes a stratigraphic sequence, completely different than that of the Cordillera.

Key words: volcanic neck, Lahar, Llanos Border, Eastern Cordillera.

Estratigrafía

Paleozoico

La unidad estratigráfica más antigua observada en la zona corresponde a pizarras de color gris azulado (Fotografía 1) con variaciones a tonos violáceos, las cuales presentan intercalaciones arenosas y en partes es notablemente micácea. Las pizarras en mención en algunos sectores mues-

tran notable sedosidad por lo cual dan la impresión de contener pirofilita o talco; meteorizan tomando un color amarillo rojizo y el desarrollo edáfico en esta unidad es relativamente pobre. Esta unidad estratigráfica presenta notable similitud con las facies pelíticas de las sedimentitas de Araracuara (Formación Araracuara, **Galvis, Huguet & Ruge**, 1979) y con la secuencia sedimentaria denominada Formación Güejar (**Trumpy**, 1943). En el área comprendida entre Villavicencio y el río Ariari no se observa la base de la

¹ Tr. 21 Bis No. 61B-33. Bogotá.

² Cl. 79 No. 14-59 apto. 501 Bogotá.

unidad estratigráfica en mención. Localmente hay buenas exposiciones al Occidente de la población de Guamal, entre la Vereda Santa Teresa y la desembocadura de las quebradas Lejía y Saldaña en el río Guamal.

A las pizarras mencionadas les sobreyacen, en forma paraconcordante, areniscas de grano fino a medio, de granos muy esféricos, prácticamente carentes de matriz, casi exclusivamente compuestas de cuarzo hialino azul claro o ahumado. Es característica la ausencia total de micas. La roca presenta color blanco a gris muy claro o un tenue tono amarillento (Fotografía 2). No se observan cambios de facies y la estructura estratigráfica mas notoria es estratificación cruzada plana a gran escala. La superficie de meteorización de estas areniscas se presenta notablemente endurecida, si se compara con la roca en general, la cual es relativamente friable.

El contacto inferior es una superficie notablemente irregular en la cual, en la base de la arenisca no se encuentra conglomerado basal, la misma granulometría se puede observar en todo su espesor. En el tope de estas areniscas se encuentran en algunos sitios unas lodolitas negras de muy poco espesor, las cuales contienen inclusiones de un mineral de color azul, cuyos cristales presentan un crecimiento radial. Parece tratarse de vivianita. En algunos sectores esta unidad presenta impregnación de petróleo.

En ninguna de las localidades observadas se encontraron fósiles ni indicios de bioturbación. Todo parece indicar que se trata de arenas de origen eólico, muy similares a las areniscas de Chiribiquete (Galvis 1994).

La unidad estratigráfica mencionada se puede observar en amplias exposiciones al Occidente de la población de Cubarral, en la cuenca del río Humadeíta, en el curso del río Guamal, aguas arriba de la desembocadura de la quebrada Saldaña, al Norte del curso medio del río Sardinata y a lo largo de la trocha que conduce de caño Negro a la vereda San Cristóbal.

Mesozoico

Sobre la unidad descrita se encuentra una secuencia de sedimentos, la cual presenta hacia la base lutitas carbonosas físis y areniscas de grano fino, finamente laminadas, cuya estratificación es ondulante. Las sobreyacen areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, guijosas, con granos notablemente angulares y matriz arcillosa. Estas sedimentitas son de color blanco a ligeramente amarillo. Las areniscas alternan con conglomerados cuarzosos, mal sorteados, cemento ftanítico y escasa matriz arcillosa. Los cambios de conglomerado a arenisca son

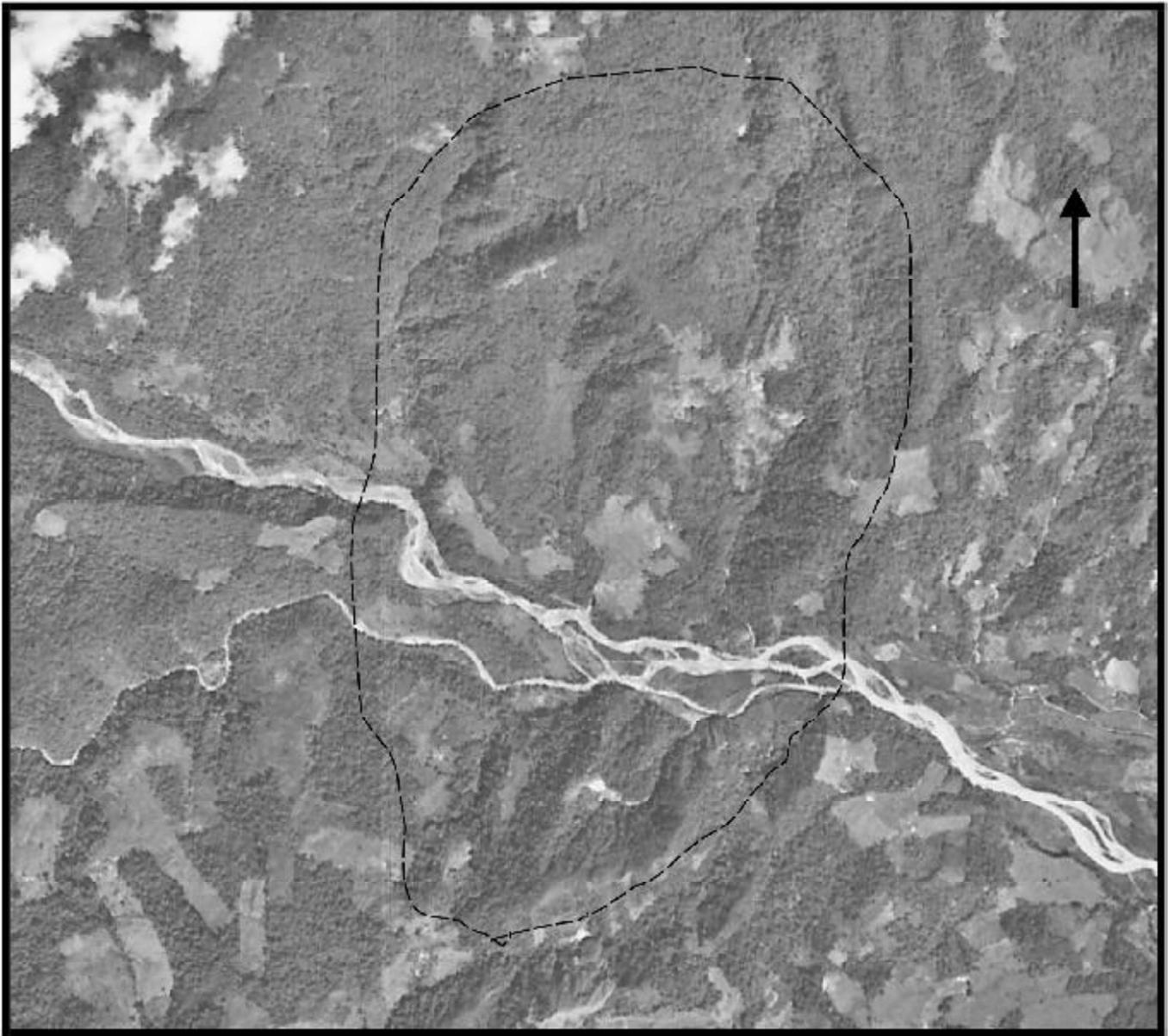


Fotografía 1. Pizarras del Ordovícico.



Fotografía 2. Areniscas eólicas Pérmico.

graduales, tanto vertical como lateralmente. Presentan estratificación cruzada ondulante y plana, y se reconocen point bars y paleocanales. En estos sedimentos de grano grueso es muy escasa la materia carbonosa.



Relieve anular originado por el cuello volcánico, -----.

También se encuentran arcillolitas de color gris, blandas, con fractura concoide que presentan suturas con material ferruginoso y en algunos niveles se observan abundantes restos vegetales y algunos niveles delgados de lignito. Las características sedimentológicas de la unidad descrita sugieren su depositación en un ambiente fluvial. Hay muy buenas exposiciones de las sedimentitas descritas en varias canteras a lo largo de las carreteras Villavicencio-Restrepo (Fotografía 3) y Villavicencio-Acacias, a lo largo del cañón del río Guayuriba. aguas arri-

ba del cruce de la vía Villavicencio-Acacias, en las riberas del río Aguas Blancas, aguas abajo de la bocatoma del acueducto de Acacias, en el Boquerón de Fresco Valle donde se observan manifestaciones de petróleo y en las riberas del río Guamal y de su afluente el caño Colorado.

El contacto de la unidad mencionada con las sedimentitas que la sobreyacen parece ser paraconcordante y es notable la presencia de un delgado nivel de un material silíceo, con aspecto de jaspe, de un color rojo encendido

el cual se observa en la vereda El Retiro. Un nivel muy similar se puede ver en el contacto de las sedimentitas del Cretáceo con las del Cenozoico en la carretera Monterrey-El Porvenir en Casanare.

Cenozoico

A continuación se presentan dos secuencias estratigráficas notablemente diferentes en su aspecto y composición. La inferior presenta hacia la base areniscas cuarzosas muy friables, de colores rosado, rojo, amarillo y café claro, muy poco consolidadas, tanto, que no alcanzan a producir guijarros en el transporte fluvial. Presentan estratificación cruzada curva y diaclasas rellenas de material ferruginoso. Se encuentran también conglomerados polimícticos (Fotografía 4), compuestos de calcedonia de diversos colores, cuarzo lechoso y limolita. La matriz es arenosa. Además hay arcillolitas caoliníticas de color gris claro, con manchas amarillentas, físciles que presentan hidróxido férrico en los planos de estratificación. No se observan fósiles, ni indicios de bioturbación. Tampoco hay materia carbonosa.

La presencia de material férrico parece indicar que se trata de sedimentos depositados en un ambiente oxidante.

Se encuentran amplias exposiciones en la vereda El Retiro y a lo largo de los ríos Acaciñas, Colepato y Orotoy.

Sobre la unidad descrita reposa una secuencia sedimentaria de mayor espesor y complejidad. En su parte inferior presenta abundante materia orgánica y claros indicios de haberse depositado en un ambiente químicamente reductor. Se encuentran arcillolitas de color gris azulado, en sectores notablemente carbonosas hasta tomar un color negro (Fotografía 5), alternando con areniscas de grano fino, duras, finamente laminadas, de color gris verdoso, con materia carbonosa en los planos de estratificación.

Sobre las sedimentitas anteriores yace un nivel de carbonatos de 20 a 30 centímetros de espesor, de color verde, con una pátina de color rojo en superficie. Su aspecto da la impresión de un depósito de carbonato de fondo lacustre. A continuación sigue una secuencia de arcillolitas, las cuales gradualmente toman un color verde más acentuado y se caracterizan por una meteorización esferoidal, la tonalidad mencionada palidece y empiezan a presentarse tonos rojizos. Lo anterior parece indicar la transición de un ambiente reductor a uno químicamente oxidante.

Al ascender en la secuencia se hallan unos niveles de una arcillolita masiva, sin planos de estratificación, dura y cohesiva cuando esta seca y notablemente plástica al humedecerse. El color es gris, ligeramente azulado (Fotografía 6) y en algunos sectores presenta tonos purpú-



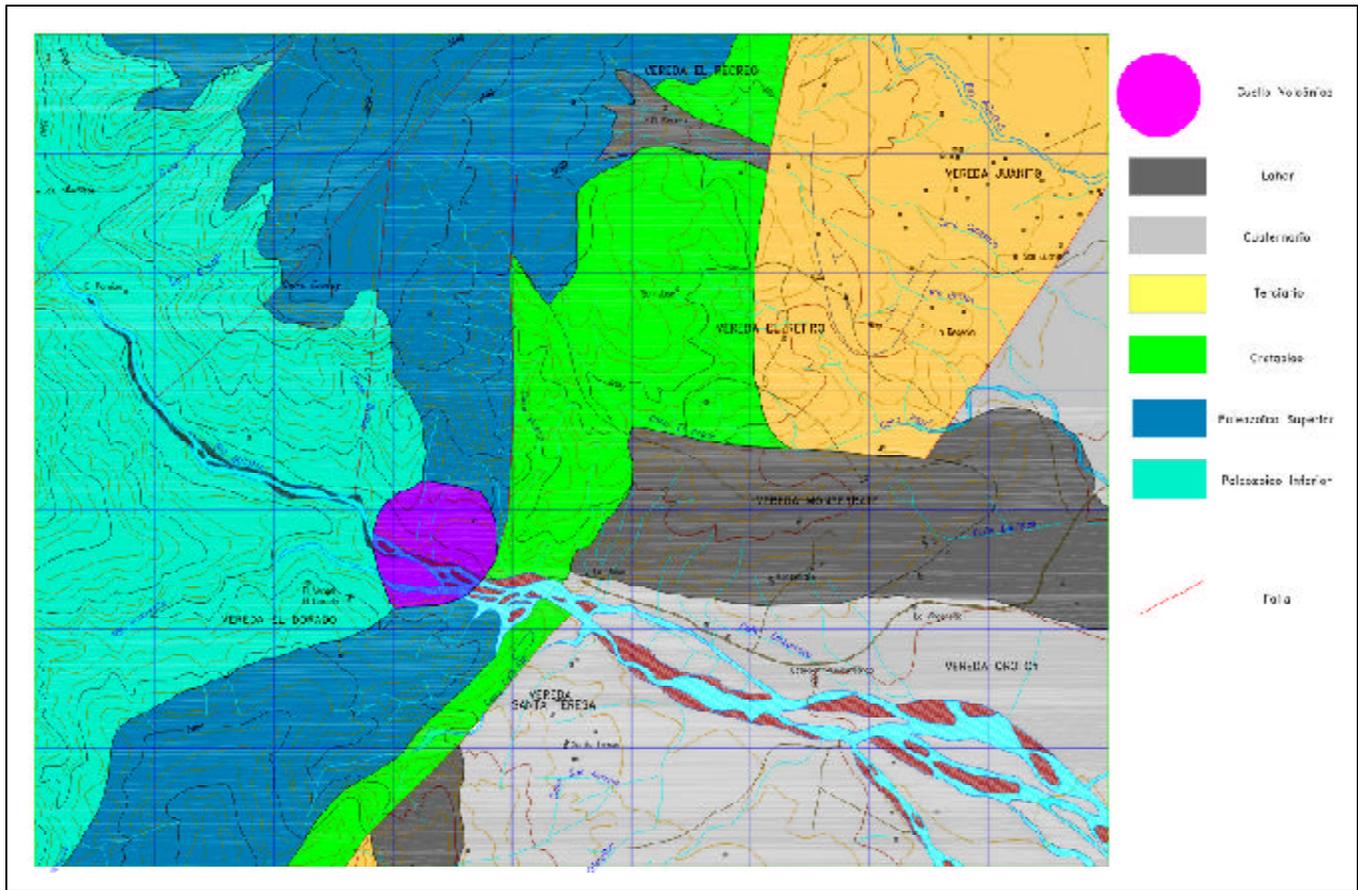
Fotografía 3. Areniscas del Cretáceo.



Fotografía 4. Conglomerado Cenozoico.



Fotografía 5. Alternancia de arcillolitas negras y areniscas.



Área de subexposición del pórfido.

reos. Rocas de aspecto similar se observan en el Cenozoico del Caquetá y se trata de cenizas volcánicas argilizadas. En el tope de la secuencia estratigráfica men-

cionada se presenta un paleosuelo laterítico (Fotografía 7), que es un ferrisol que caracteriza al Eoceno superior en muchas localidades.



Fotografía 6. Cenizas volcánicas argilizadas.



Fotografía 7. Paleosuelo laterítico.

En orden cronológico, la siguiente unidad litológica la constituye un pórfido de color gris verdoso (Fotografía 8), el cual aflora entre los caños Hondo y Blanco al Norte del río Guamal, donde se observa en contacto con las pizarras que constituyen la base de la secuencia estratigráfica observable en toda la región al Norte del río Ariari. En la ribera Sur del río Guamal, en la trocha que conduce a la vereda El Dorado, el pórfido se observa intruyendo las areniscas eólicas antes mencionadas (Fotografía 9).

En todo el sector, especialmente al norte del río Ariari, se observa una depresión circular cubierta por una terraza, la cual sobreyace la mayor parte de la exposición del pórfido. Se trata de un cuello volcánico, alrededor del cual las rocas sedimentarias se presentan verticalizadas y hasta parcialmente invertidas. Al Sur, en el curso del caño Colorado se presenta una pequeña planicie, aparentemente debida al subafloramiento de una apófisis del pórfido. Allí se observan grandes bloques de pórfido con xenolitos de las sedimentitas cenozoicas (Fotografía 10), características de la zona. El pórfido en mención se compone de fenocristales de cuarzo y feldespato de potasio en una mesóstasis microcristalina. Se observan además láminas de biotita. La composición parece estar entre riolita y riodacita.

A partir de las exposiciones de pórfido, hacia el Este se encuentra un amplio lahar que cubre gran parte de la vereda Monserrate y continúa hasta la llanura donde se extiende algunos kilómetros hasta inmediaciones de la población de Guamal. El lahar mencionado cubre en su recorrido las sedimentitas del Cenozoico antes descritas y en él se observan bloques aglomeráticos de vulcanitas de color verde las cuales contienen fenocristales de cuarzo en una mesóstasis vítrea. Dichos bloques presentan una corteza de meteorización muy característica (Fotografía 11) y generan andosoles típicos de vulcanitas.

En la cuenca del río Humadeita parece hallarse otro cuello volcánico similar, ya que se observan guijarros de un pórfido muy similar al del río Guamal. Al Sur del río Ariari se encuentran extensos suelos típicos de rocas volcánicas, lo cual parece indicar que la actividad efusiva se extiende mucho más.

Sedimentitas recientes

Se encuentran tres clases de depósitos recientes: terrazas, abanicos fluviales y aluviones propiamente dichos. Entre las terrazas cabe mencionar algunas en el curso medio del río Humadeita, las cuales presentan un notable endurecimiento de las arcillas, en especial la terraza que cubre parcialmente el cuello volcánico del río Guamal. Los abanicos

fluviales más extensos se encuentran al Sur en la zona de Cubarral. Los aluviones se pueden observar a lo largo de los ríos Acacias, Guayuriba y Ariari.

Tectónica

Para entender la evolución geológica de la zona de Guamal, es necesario partir de un rasgo fundamental: la Falla de Borde Llanero, un gran fallamiento direccional con rumbo NE-SW, el cual pone en contacto dos bloques de dimensiones continentales, cuya evolución geológica es completamente diferente y por lo tanto sus respectivas unidades litológicas no son correlacionables entre sí. El bloque noroccidental lo constituyen los Andes Colombo-Venezolanos, una microplaca diferente al resto de Sudamérica; y el bloque Sureste lo constituye la Placa Suramericana. El cuello volcánico objeto del presente artículo se encuentra íntegramente dentro de esta última.

En vecindades del foco volcánico en referencia se presentan dos sistemas de fallas con rumbos NE-SW y N-S, los cuales parecen estar genéticamente relacionados con la gran falla antes mencionada. Estos dos sistemas de fallas parecen haber iniciado su actividad antes del levantamiento andino, por lo cual sus trazos se observan diagonales respecto al levantamiento cordillerano. El levantamiento de la Cordillera Oriental parece haberse originado en un tectonismo de bloques, ya que los buzamientos medidos no pasan de 40 grados excepto en la periferia del cuello volcánico, donde alcanzan a presentarse capas verticales.

Las principales fallas NE-SW se encuentran en el caño Colorado, corriente encauzada por una de estas fallas, la del río Orotoy y las que encauzan a los caños Lejía y Pajuil y al río Acaciñas. Entre las fallas N-S, cabe mencionar la de Fresco Valle, la del Alto de la Cumbre, y las que encauzan a los caños Hondo y Blanco. Entre las fallas NE-SW y las N-S se presentan en la intersección en ángulo agudo, cierres sinclinales y en las intersecciones en ángulo obtuso, estructuras positivas en forma de abanico; un buen ejemplo de estas últimas, se encuentra entre las Fallas de Fresco Valle y río Acaciñas.

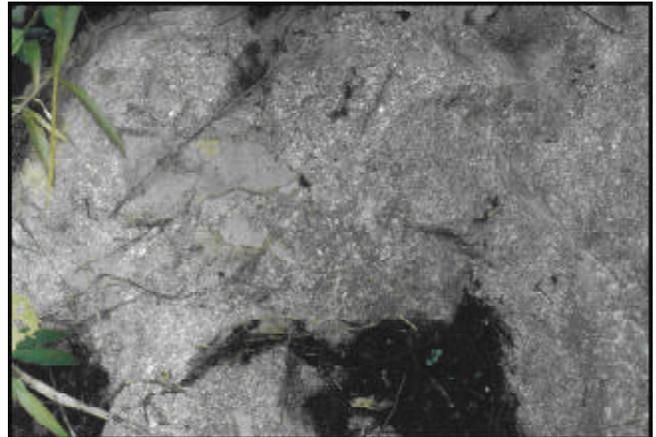
Por último, cabe mencionar el efecto tectónica de la intrusión del río Guamal, el cual produjo una estructura dómica, alrededor de la cual las capas sedimentarias se presentan verticales y aún ligeramente invertidas.

Conclusiones

El hallazgo de actividad ígnea del Cenozoico en el borde occidental de la Orinoquia, es interesante en varios as-



Fotografía 8. Pórfido.



Fotografía 10. Pórfido con xenolitos de unidades litológicas del Cenozoico.



Fotografía 9. Contacto areniscas-pórfido.



Fotografía 11. Aspecto de los bloques del lahar.

pectos. En primer lugar, cabe anotar que dicho fenómeno no se limita al foco volcánico mencionado, hay claros indicios de actividad volcánica al Sur del río Ariari y parece haberla en Casanare. Este magmatismo pudo tener un efecto de cracking en los crudos pesados, dando origen a los crudos relativamente livianos de Cusiana, Apiay y Caño Limón. El carácter secundario de estos aceites lo reafirma la presencia de agua de empuje dulce.

Además, es importante anotar las posibilidades metalogénicas que abre la actividad ígnea en el Borde Llanero. Se conoce por datos de habitantes de la región que el río Guamal transporta arenas auríferas, a diferencia del río Acacías y otros de la zona en cuyas cuencas no hay indicios de actividad magmática.

Por otra parte es conocida la feracidad de las tierras de Guamal, en las áreas cubiertas por el lahar.

Bibliografía

- Galvis, J., Huguet, A. y Ruge, P.** 1979. Geología de la Amazonia Colombiana Bol. Geol. No. 22, pp. 1-86.
- Galvis, J.** 1994. Estudio Geológico de la Sierra de Chiribiquete y zonas aledañas (Parque Nacional-Natural Chiribiquete). Rev. Acad. Col. de Ciencias Fis. Ex. y Nat. Vol. XIX. No. 73, pp. 275-286.
- Trumpy D.** 1943. Pre-cretaceous of Colombia. Bull. Geol. Soc. Amer., Vol. 54, No. 9, pp. 1281-1304.

Recibido: agosto 12 de 2008

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2009

EL PERIODO CÁLIDO MEDIEVAL Y LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO EN EL NEOTRÓPICO

Por

Yuri Carolina García Castro¹ & José Ignacio Martínez²

Resumen

García Castro, Y. C., J. I. Martínez: El periodo cálido medieval y la pequeña edad de hielo en el Neotrópico. *Rev. Acad. Col. Cienc. Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **33** (129): 477-489, 2009. ISSN 0370-3908.

En el Neotrópico existen registros paleoclimáticos marinos y continentales que sugieren la ocurrencia de condiciones relacionadas con el Período Cálido Medieval (MWP, ~800-1300 AD) y la Pequeña Edad de Hielo (LIA, ~1300-1800 AD). Sin embargo, la falta de sincronicidad en los eventos paleoclimáticos entre algunos registros (e.g. costeros y de los Andes), reflejan una respuesta geográfica variable al cambio climático. Se discuten aquí: (1) la complejidad de factores climáticos que modulan el clima tropical, (2) la diversidad de respuestas paleoclimáticas, (3) el sesgo debido al escaso número de registros paleoclimáticos en el Neotrópico, (4) las limitaciones de los métodos de datación y, (5) los impactos de los eventos del MWP y la LIA a escalas regionales. Finalmente sugerimos áreas prospectivas para futuros estudios.

Palabras clave: correlación paleoclimática, variabilidad climática, teleconexiones inter-hemisféricas, Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, Zona de Convergencia Intertropical.

Abstract

In the Neotropics marine and continental paleoclimatic records suggest the occurrence of conditions related to the Medieval Warm Period (MWP, ~800-1300 AD) and the Little Ice Age (LIA, ~1300-1800 AD). However, the lack of synchronicity in the paleoclimatic events between some records (e.g. coastal and Andean), reflect variable geographical responses to climate change. Herein we discuss: (1) the complex climate factors that modulate the tropical climate, (2) the diversity of the paleoclimate response, (3) the bias introduced by the scarce number of paleoclimate records in the Neotropics, (4) the limitations introduced by the current dating techniques and, (5) the impacts of the MWP and LIA at regional and global scales. Finally we suggest areas for future studies.

Key words: paleoclimate correlation, climate variability, inter-hemispheric tele-connections, El Niño-Southern Oscillation, Intertropical Convergence Zone.

¹ Área de Ciencias del Mar, Departamento de Geología, Universidad EAFIT. Correo electrónico: ygarciac@eafit.edu.co

² Carrera 49 N° 7 Sur - 50, Medellín, Colombia.

1. Introducción

Estudios paleoclimáticos del Holoceno sugieren la ocurrencia de un periodo de enfriamiento generalizado, pero altamente fluctuante, del clima conocido como la Pequeña Edad de Hielo (*Little Ice Age*, LIA), comprendido entre ~1300-1850 AD, subsiguiente a un periodo cálido (800-1300 AD) que mantuvo temperaturas semejantes a las actuales llamado Óptimo Medieval o Periodo Cálido Medieval (*Medieval Warm Period*, MWP; e.g. **Bradley & Jones**, 1993; **Hughes & Díaz**, 1994; **Crowley**, 2000; **Crowley & Lowery**, 2000; **Grove**, 2001; **Jones et al.**, 2001; **Hendy et al.**, 2002; **Cronin et al.**, 2003; **Jones & Mann**, 2004). Aunque el MWP y la LIA son considerados eventos paleoclimáticos a escala hemisférica, su documentación para el norte de Suramérica es aún insuficiente y sólo se interpretan en forma incompleta. A pesar de que los trópicos recientemente han adquirido una importancia alta debido a su papel como áreas reguladoras del clima global (**González et al.**, 2008; **Vecchi et al.**, 2008) su conocimiento es aún incipiente y requiere tanto del estudio de registros paleoclimáticos a diferentes escalas de tiempo y mediante una cobertura geográfica densa (e.g. **Winter et al.**, 2000; **González et al.**, 2008; **Vecchi et al.**, 2008).

A pesar de la oscilación aparente cálido-frío entre el MWP y la LIA estos eventos no fueron realmente cambios climáticos continuos, sino variaciones a pequeñas escalas espacio-temporales (**Grove**, 2001). La falta de sincronidad de los eventos paleoclimáticos del MWP y la LIA entre diferentes sitios del planeta (e.g. **Crowley**, 2000), sumado a la falta de suficientes registros paleoclimáticos e instrumentales (**Crowley & Lowery**, 2000; **Grove**, 2001) hacen difícil determinar su posible relación causa-efecto a escala global (**Bradley et al.**, 2003b). Las tendencias paleoclimáticas opuestas en algunos registros soportan la necesidad de re-evaluar el uso de los términos Pequeña Edad de Hielo y Período Cálido Medieval basados en la variabilidad decadal y centenaria (e.g. **Bradley & Jones** 1993; **Jones & Mann**, 2004). Más aun, **Hughes & Díaz** (1994) proponen cambiar el término Período Cálido Medieval por el de Anomalía Climática Medieval, limitando así el efecto de la temperatura.

En esta revisión se comparan los registros paleoclimáticos del MWP y la LIA en el Neotrópico (Mesoamérica y norte de Suramérica), se analizan sus causas y efectos a escala global, y se evalúan las hipótesis de sus tele-conexiones inter-hemisféricas con énfasis en el continente americano (e.g. **Goosse et al.**, 2004; **Turney & Palmer**, 2007). Adicionalmente se examinan los sesgos introducidos por los métodos cronológicos disponibles, los proble-

mas introducidos por la escasez de registros. Finalmente, se proponen áreas de posible interés paleoclimático en el Neotrópico.

2. Los registros del MWP y la LIA en latitudes altas

2.1. El MWP y la LIA en el hemisferio norte

Cambios climáticos ocurridos desde la última glaciación en latitudes altas del Atlántico Norte, parecen relacionados con cambios en la circulación termohalina (*Termohaline circulation*, THC; e.g. **Broecker**, 2000; **Keigwin & Boyle**, 2000; **Clark et al.**, 2002; **Bradley et al.**, 2003a; **Cronin et al.**, 2003). Cambios en el balance hidrológico, producto del derretimiento de los casquetes polares, producen un descenso en la salinidad oceánica superficial (*Sea Surface Salinity*, SSS) y la formación de aguas profundas, frenando así la circulación termohalina y el transporte de calor a los polos (**Stocker & Marchal**, 2000). Tal mecanismo parece haber sido el responsables de la LIA (**Broecker**, 2000; **Turney & Palmer**, 2007). En contraste, la circulación termohalina habría sido más activa durante el pico Cálido Medieval en Groenlandia e Islandia (**Crowley & Lowery**, 2000). Sin embargo, la conexión entre condiciones climáticas frías y la THC aún se discute.

En reconstrucciones paleoclimáticas del hemisferio norte, el MWP ha sido definido como el intervalo climático antecedente a la LIA, caracterizado por un aumento de la temperatura global y reducción del volumen de hielo (e.g. **Hughes & Díaz**, 1994; **Crowley**, 2000; **Crowley & Lowery**, 2000; **Bradley et al.**, 2003b). **Crowley & Lowery** (2000), a partir de una reconstrucción climática global de multi-indicadores, concluyen que el MWP se caracterizó en el hemisferio norte como un periodo compuesto por tres intervalos de tiempo cálido (1010-1040, 1070-1105, y 1155-1190 AD), coincidiendo con una sequía prolongada en el oeste de Estados Unidos (**Bradley et al.**, 2003b). Sin embargo, la definición de estos picos cálidos no está soportada por todos los registros usados para esta reconstrucción (e.g. Alemania y oeste de China), donde se presenta una tendencia climática inversa a la característica de este evento climático. La reconstrucción dendroclimatológica de la temperatura en el hemisferio norte permite visualizar la variabilidad climática centenaria para un periodo cálido 960-1050 AD, i.e. el MWP, y un periodo frío entre 1200-1950 AD, i.e. la LIA (**Cook et al.**, 2004).

En el registro de temperatura en la Bahía de Chesapeake (Estados Unidos), el MWP presenta una alternancia de condiciones climáticas (Fig. 1). Un periodo de enfriamiento de 2-3°C separa lo que **Cronin et al.** (2003) definen como el MWP temprano entre 450-900 AD (MWP-I) y el MWP pro-

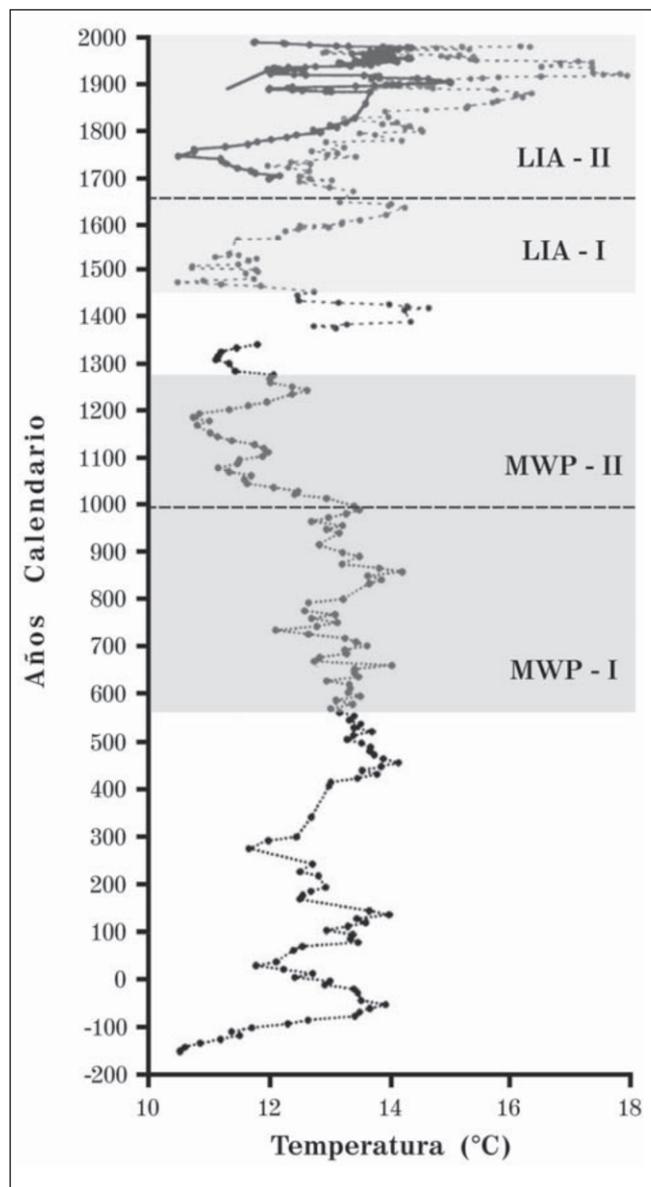


Figura 1. Registro de la temperatura superficial del agua en primavera en la Bahía Chesapeake (Estados Unidos), reconstruida a partir de la relación Mg/Ca de valvas de ostrácodos para los últimos 2200 años (Tomado de Cronin *et al.*, 2003).

piamente dicho entre 1000-1300 AD (MWP-II). La LIA se observa como un periodo compuesto por dos picos LIA-I (1450-1530 AD) y LIA-II (1720-1850 AD), los cuales corresponden a temperaturas 4.7 y 2.4°C más frías que las correspondientes al siglo XX, respectivamente (Cronin *et al.*, 2003). Sin embargo, algunos autores sugieren que el intervalo de la LIA no se relaciona con condiciones climáticas propiamente dichas, sino con un periodo de expansión glacial en todos los continentes (Grove, 2001). Entre las evi-

dencias de la LIA existentes para el Atlántico Norte, no existe un consenso con respecto a su extensión temporal (Bradley & Jones, 1993), de tal forma que las diferencias observadas entre regiones aledañas reflejarían más bien condiciones paleoclimáticas regionales (Grove, 2001).

2.2. El MWP y la LIA en Chile y Argentina

En el estudio multi-indicadores del pantano Isla Grande (Tierra de Fuego), para los últimos 1400 años, se registra un periodo de condiciones secas (960-1020 AD) correspondiente al MWP, sugiriendo así su sincronización con el hemisferio norte (Mauquoy *et al.*, 2004). Para el evento de la LIA, este registro resulta insuficiente, sugiriendo solo un periodo de condiciones frías y húmedas entre 1030-1100 AD.

Harrison *et al.* (2007) definen la LIA en Suramérica con el término de Periodo Glaciar IV (1450-1650 AD), correspondiente a un intervalo de avance de 11 casquetes glaciares al norte de la Patagonia (Chile), datados por dendrocronología, liquenometría y radiocarbono. Adicionalmente, en el Lago Frías (Argentina), es evidente un mayor avance glacial durante 1800-1850 AD (Ariztegui *et al.*, 2007). En el Lago Frías la frecuencia de las varvas es modulada por periodos de 2.5 a 3 años, correspondiente a una señal regulada aparentemente por la influencia del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO; Ariztegui *et al.*, 2007). Las dataciones de la LIA para las latitudes altas de Chile y Argentina dejan ver un retraso en la respuesta climática de casi 400 años entre dos sitios geográficamente cercanos, lo cual refleja diferencias regionales. Ubicando estos registros dentro del marco global de ocurrencia de la LIA, estos corresponden a un intervalo significativamente más corto que el documentado para el hemisferio norte.

3. El MWP y la LIA en el Neotrópico

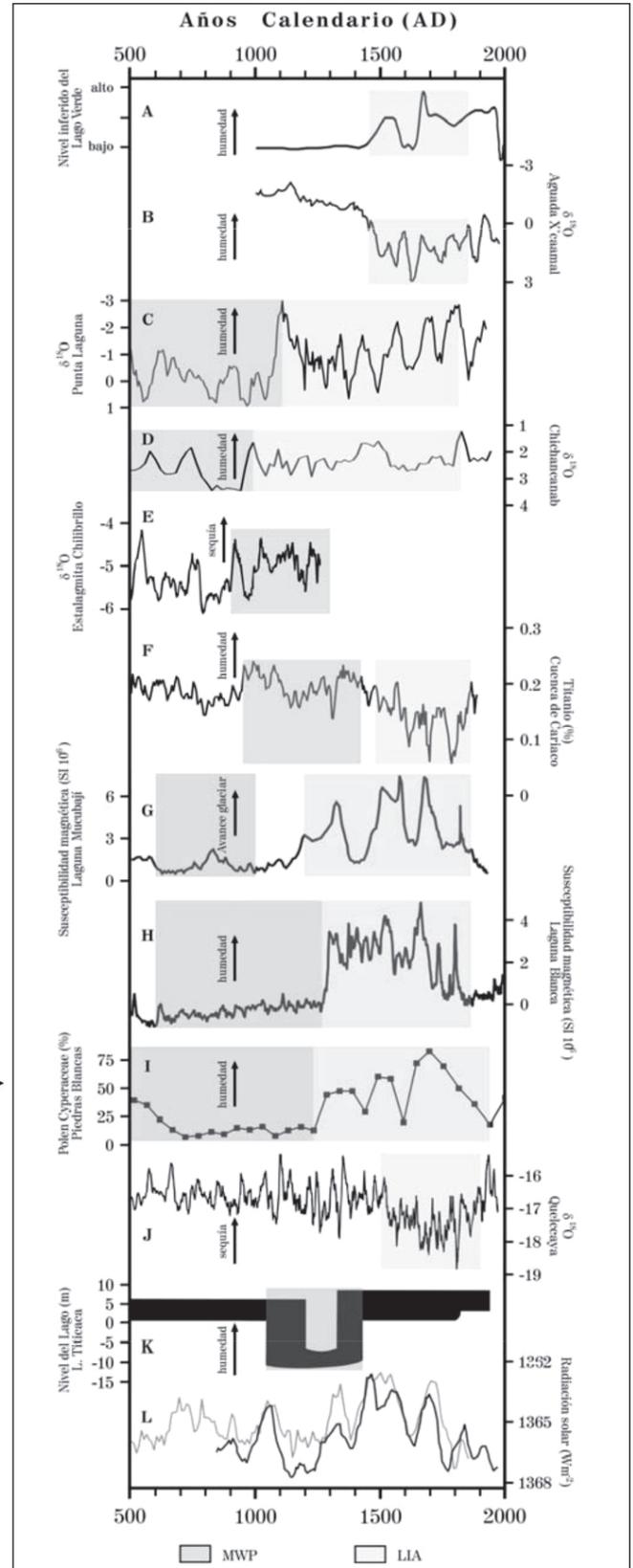
Registros de alta resolución del MWP y la LIA en el Neotrópico han sido estudiados en: (1) sedimentos lacustres de la península de Yucatán (México; e.g. Hodell *et al.*, 1995; Curtis *et al.*, 1996; Hodell *et al.*, 2001; Hodell *et al.*, 2005), Golfo de México (e.g. Lozano-García *et al.*, 2007), Andes venezolanos (Rull *et al.*, 1987; Polissar *et al.*, 2006a) y en el Lago Titicaca (Abbot *et al.*, 1997; Binford *et al.*, 1997), (2) sedimentos marinos laminados de la Cuenca de Cariaco (Venezuela; e.g. Haug *et al.*, 2001; Peterson & Haug, 2006), (3) la estalagmita de Chilibrillo (Panamá; Lachniet *et al.*, 2004), (4) corales del Caribe (e.g. Winter *et al.*, 2000; Watanabe *et al.*, 2001), (5) glaciares andinos (e.g. Thompson *et al.*, 1986; Thompson *et al.*, 1995; Liu *et al.*, 2005) y (6) geomorfología (e.g. Rabatel *et al.*, 2005; Solomina *et al.*, 2007; Unkel *et al.*, 2007; Jomelli *et al.*,

2008). Aún así, existen diferencias en las dataciones y en el régimen climático de estos eventos a escala continental. Los contrastes en la respuesta climática son atribuidos a condiciones climáticas regionales moduladas por la interacción con fenómenos de escala global como el ENSO para los Andes tropicales y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO; e.g. Jones & Mann, 2004; Polissar *et al.*, 2006b).

3.1. Registros paleoclimáticos continentales de Mesoamérica y los Andes del norte

Una diferencia marcada en el paso de condiciones secas a húmedas es evidente en el registro lacustre basado en polen, materia vegetal carbonizada (*charcoal*) y diatomeas en Lago Verde (Golfo de México; Fig. 2A). En el registro de Lago Verde, el periodo de la LIA (1350-1850 AD) se caracteriza por un aumento marcado del nivel del lago y una cobertura extensa de bosque húmedo tropical (Lozano-García *et al.*, 2007). El aumento del nivel del Lago se correlaciona directamente con un aumento en la precipitación. Aumentos en la precipitación favorecen el avance glaciar, el cual caracterizó el periodo del LIA en los Andes venezolanos (Polissar *et al.*, 2006a). El avance glaciar ha sido una de las condiciones climáticas características de este periodo en latitudes altas de Europa y Norte América (Grove, 2001). En contraste con el registro del Lago Verde, en el registro $\delta^{18}\text{O}$ de Aguada X'caamal (Península de Yucatán; Fig. 2B) la señal paleoclimática de la LIA es registrada como un periodo seco entre 1450 y 1900 AD. Esta interpretación está apoyada en la presencia del foraminífero bentónico *Ammonia beccarii* propio de aguas salobres a salinas (Hodell *et al.*, 2005).

Figura 2. Registros paleoclimáticos para Mesoamérica y el norte de Suramérica comparados con los índices de actividad solar. Se señalan los periodos correspondientes al MWP y la LIA para cada registro. (A) Nivel del Lago Verde (México; Lozano-García *et al.*, 2007). (B-D) Registros $\delta^{18}\text{O}$ lacustres de la Península de Yucatán; note las señales paleoclimáticas inversas entre las épocas húmedas en Chichancanab (Hodell *et al.*, 1995) y Punta Laguna (Curtis *et al.*, 1996), y la época seca en Aguada X'caamal (Hodell *et al.*, 2005) durante la LIA. (E) Registro $\delta^{18}\text{O}$ de la estalagmita de Chilibrillo (Panamá; Lachniet *et al.*, 2004). (F) Registro de Ti (%) de la Cuenca de Cariaco (Venezuela; Haug *et al.*, 2001). (G-H) Registros de susceptibilidad magnética (SM) de las lagunas Mucubají y Blanca (Polissar *et al.*, 2006a) como indicadores de avances glaciares en los Andes venezolanos. (I) Registro de abundancia de polen de Cyperaceae en la Laguna Piedras Blancas (Rull *et al.*, 1987), cerca de la L. Mucubají. (J) Registro $\delta^{18}\text{O}$ del glaciar de Quelccaya (Perú; Thompson *et al.*, 1986). (K) Nivel del lago Titicaca (Perú-Bolivia; Abbott *et al.*, 1997). (L) Reconstrucción del índice mínimo (línea negra) y máximo (línea gris) de radiación solar para los últimos 1500 años (tomado de Polissar *et al.*, 2006a).



En la Península de Yucatán los registros de isótopos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) de ostrácodos en los lagos Chichancanab (**Hodell et al.**, 1995) y Punta Laguna (**Curtis et al.**, 1996), muestran una alternancia de condiciones climáticas secas y húmedas. La correspondencia entre los periodos secos de Chichancanab (800-1000 AD) y Punta Laguna (600-1000 AD; Fig. 2C-D), con el periodo clásico tardío y postclásico temprano de la civilización Maya, permiten sugerir que las sequías extremas habrían conducido a su colapso (**Hodell et al.**, 1995; **Curtis et al.**, 1996; **Hodell et al.**, 2001). De interés es la correlación del intervalo de sequía con un incremento en la concentración de micro-partículas en el registro de hielo de Quelccaya (Andes peruanos; **Hodell et al.**, 1995; **Curtis et al.**, 1996) y con aumentos en la actividad solar (**Hodell et al.**, 2001). Cambios en la energía solar en el trópico parece estar relacionado con cambios en la ZCIT (**Polissar et al.**, 2006a). Posterior al intervalo de sequía se observa un regreso a condiciones más húmedas. Sin embargo, este intervalo, aunque más húmedo que el anterior, no presenta condiciones climáticas constantes. Más bien fue un periodo de contraste marcado entre intervalos secos y húmedos (**Curtis et al.**, 1996), que no ha sido referido a la ocurrencia de la LIA en esta región.

En apoyo a la hipótesis de la civilización Maya por un periodo de sequía extremo, la señal de precipitación, derivada del registro $\delta^{18}\text{O}$ de la estalagmita de Chilibrillo (Panamá; Fig. 2E), evidencia un episodio seco entre 900 y 1310 AD y una “anomalía hidrológica” (1100-1220 AD), al parecer influenciado con la circulación atmosférica ligada al fenómeno ENSO (**Lachniet et al.**, 2004). Es decir, una posición más austral de la zona de convergencia inter-tropical (ZCIT; e.g. **Poveda et al.**, 2006).

En el registro paleoclimático de las lagunas Mucubaj y Blanca (Andes venezolanos) para los últimos 1800 años se evidencian cuatro intervalos de avance glaciar (1180-1350, 1450-1590, 1640-1730 y 1800-1820 AD), definidos con base en aumentos de la susceptibilidad magnética (Fig. 2G-H). Estos intervalos de avance glaciar corresponden a aumentos de la humedad, definido por porcentaje de polen de Cyperaceae en la Laguna Piedras Blancas (Fig. 2I), disminución en el nivel de las zonas de vegetación y de la radiación solar, relacionando con la LIA (**Polissar et al.**, 2006a). A pesar que para este registro no se hace referencia al MWP, es evidente una estación climática seca antecediendo a la LIA.

Es importante resaltar que las señales paleoclimáticas de los Andes venezolanos presentan un contraste marcado con el registro de la cuenca de Cariaco. **Polissar et al.**, (2006a) discuten esta diferencia respaldados en que el

drenaje de los Andes venezolanos no influye en la sedimentología de la cuenca de Cariaco, dado que el drenaje de estos sedimentos atraviesa primero el Lago Maracaibo y el Río Orinoco. Sin embargo, la explicación a estas diferencias paleoclimáticas marcadas podría estar enmarcada en diferencias geográficas, topográficas e incluso bióticas regionales (**Lozano-García et al.**, 2007).

Otra señal paleoclimática que apoyan la ocurrencia de un periodo climático seco (i.e. MWP) que habría afectado a las civilizaciones precolombinas i.e. Civilización Maya, se encuentra en el registro del Lago Titicaca (Perú-Bolivia), en que se evidencia un periodo seco (1050-1450 AD) en fase con uno de los periodos secos registrado en el glaciar de Quelccaya (1040-1490 AD; **Thompson et al.**, 1985). Este periodo seco, reflejado en la disminución marcada del Lago Titicaca (Fig. 2K), coincide con el decaimiento de la producción agrícola y el consecuente colapso de la civilización Tiwanaku (**Abbott et al.**, 1997; **Binford et al.**, 1997). Posterior a este periodo seco se observa un aumento considerable del nivel del lago, sugiriendo un retorno a condiciones más húmedas, las cuales corroborarían la hipótesis de la ubicación más austral de la ZCIT durante el periodo de la LIA. Sin embargo, no se establece la ocurrencia de este periodo, por falta de dataciones radiocarbono (**Binford et al.**, 1997).

En el registro polínico del glaciar Sajama (Bolivia), la LIA se presenta como dos intervalos paleoclimáticos opuestos, uno húmedo (1500-1700 AD) y uno seco (1700-1880 AD), definidos con base en la relación Poaceae/Asteraceae (P/A), taxa que responden a condiciones climáticas húmedas y secas, respectivamente (**Liu et al.**, 2005). En este punto es discutible la determinación paleoclimática basada exclusivamente en la relación P/A, familias que ecológicamente son cosmopolitas y, presentan altas tasas de producción y dispersión de polen, y por consiguiente un alto “efecto *background*” (presencia de un taxón, donde no ocurre su cobertura vegetal; **Grabandt**, 1980). Sin embargo, el registro polínico del glaciar de Sajama parece corroborar el registro de $\delta^{18}\text{O}$ del glaciar de Quelccaya (**Thompson et al.**, 1986) Adicionalmente, la ocurrencia del periodo seco corresponde cercanamente con el registrado en el glaciar de Huascarán (Perú) para el intervalo 1730-1870 AD (**Thompson et al.**, 1995).

Dataciones liquenométricas de 10 morrenas glaciares de Charquini (Bolivia) sitúan el punto máximo de la LIA durante la segunda mitad del siglo XVII, i.e. finalizando entre 1870 y 1910 (**Rabatel et al.**, 2005). Estas dataciones corresponden con las realizadas, con el mismo método de datación, en la Cordillera Blanca (Perú; **Solomina et al.**, 2007). Esta sincronidad sugiere un cambio climático a

escala regional (Rabatel *et al.*, 2005; Jomelli *et al.*, 2008), contrastando con el avance glaciario del hemisferio norte, el cual se prolongó hasta mediados del siglo XIX (Groove, 2001), reforzando así la hipótesis de cambios climáticos a escala regional (e.g. Liu *et al.*, 2005; Rabatel *et al.*, 2005; Jomelli *et al.*, 2008).

3.2. Registros paleoclimáticos del Mar Caribe

En el registro laminado de la cuenca de Cariaco (Venezuela; Fig. 2F), se evidencia un intervalo de alta precipitación durante 950-1450 AD, i.e. el MWP, contrastando con un intervalo seco marcado durante 1500-1850 AD, i.e. la LIA. El intervalo de sequía está definido por una disminución marcada en el contenido de titanio, interpretada como una disminución en el aporte terrígeno consecuencia de una disminución en la precipitación (Haug *et al.*, 2001; Peterson & Haug, 2006). El intervalo seco en la cuenca de Cariaco sería, por tanto, una respuesta directa de la posición más austral de la ZCIT (Haug *et al.*, 2001). La migración austral de la ZCIT (Fig. 3), aparentemente corresponde con la señal de una condición lluviosa más al sur de Suramérica, la cual se relacionaría con las características de la LIA registradas en el Lago Frías (Argentina; Ariztegui *et al.*, 2007) y estarían asociadas a la modulación del fenómeno ENSO, y la señal de la LIA en el registro $\delta^{18}\text{O}$ del glaciar de Quelccaya (Thompson *et al.*, 1986). Allí los valores más negativos de la señal $\delta^{18}\text{O}$ son indicadores de temperaturas frías o húmedas (Fig. 2J).

Al noreste del mar Caribe, la reconstrucción de la temperatura oceánica superficial (*Sea Surface Temperature*, SST), a partir de $\delta^{18}\text{O}$ del coral *Montastrea faveolata*, para tres intervalos de tiempo durante la LIA (1700-1705, 1780-1785 y 1810-1815 AD) exhibe una disminución de 2-3°C, coincidente con la disminución de la salinidad superficial (SSS; Winter *et al.*, 2000). Condiciones análogas fueron inferidas mediante el estudio de la relación Mg/Ca y $\delta^{18}\text{O}$ de *M. faveolata* en la costa de Puerto Rico para el periodo 1609-1703 AD (Watanabe *et al.*, 2001). La disminución en la SST puede traducirse en una disminución de la evaporación (Winter *et al.*, 2000). Una causa de estas condiciones paleoclimáticas podría encontrarse en la migración estacional hacia el sur de la ZCIT (Fig. 3) durante la LIA (Watanabe *et al.*, 2001). Esto apoyaría la hipótesis de un periodo seco en el norte de Suramérica durante la LIA (Haug *et al.*, 2001). Una tendencia similar ha sido encontrada en el suroeste del Pacífico, en la Gran Barrera de Coral (Hendy *et al.*, 2002).

La evaluación de la respuesta climática al forzamiento volcánico utilizando el modelo Zebiak-Cane, muestra una tendencia hacia condiciones húmedas tipo La Niña duran-

te el MWP y condiciones secas tipo El Niño durante la LIA (Mann *et al.*, 2005). Esta tendencia de los modelos es respaldada por las bajas tasas de radiocarbono durante la LIA en el Pacífico, las que a su vez son el resultado de la fase cálida de El Niño, durante la cual la termoclina se profundiza en el Océano Pacífico oriental y por consiguiente se detiene la surgencia de aguas ricas en CO_2 (Turney & Palmer, 2007).

4. Discusión

Como resulta aparente de las evidencias resumidas arriba, varios factores afectan el valor de las interpretaciones paleoclimáticas en el Neotrópico. Entre estos se destacan, entre otros: (1) la escasez y calidad de los registros paleoclimáticos, (2) la imprecisión en los métodos de datación disponibles, y (3) el entendimiento limitado de los mecanismos que regulan el clima en el trópico. Es solo así será posible comparar y entender el registro de los eventos MWP y LIA a escala geográfica, regional del Neotrópico y global.

4.1. Escasez de registros paleoclimáticos

Reconstrucciones de la variabilidad climática se han interpretado en términos de tendencias globales como el MWP y la LIA. Sin embargo, estas definiciones han sido expuestas por investigadores que han basado sus estudios en registros mayoritariamente europeos y del Atlántico Norte (Jones & Mann, 2004). Teniendo en cuenta la falta de registros de alta resolución a escala global, especialmente en áreas geográficamente poco exploradas y documentadas como el Neotrópico, no es sorprendente la dificultad en encontrar sincronización real entre los diferentes eventos paleoclimáticos alrededor del globo (Bradley & Jones, 1993; Hughes & Díaz, 1997). Los registros disponibles no presentan las características que permitan realizar reconstrucciones paleoclimáticas a escala global debido a: (1) la ausencia de una resolución temporal alta, (2) el escaso y muchas veces impreciso control temporal, (3) el carácter cualitativo de las reconstrucciones (Farrera *et al.*, 1999). Las limitaciones en el número de registros, y de la calidad de las reconstrucciones derivadas de los mismos, llevan a plantear que la definición de los eventos paleoclimáticos MWP y LIA debería limitarse al hemisferio norte (Bradley & Jones, 1993). De otro lado, existen grandes diferencias entre los registros regionales de temperatura instrumental y las tendencias hemisféricas (Crowley & Lowery, 2000; Jones *et al.*, 2001). Una forma de comprender los eventos pasados y encontrar las posibles analogías entre los factores y efectos que afectan el sistema climático global y en el Neotrópico debe basarse en evi-



Figura 3. Variación estacional media de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre Mesoamérica y norte de Suramérica.

Estas variaciones controlan los periodos de lluvias regionales, presentándose época de sequía en Mesoamérica y el Caribe cuando esta se encuentra más al sur. Se muestra la ubicación de algunos de los registros mencionados en el texto (1) Lago Verde, (2) Aguada X'caamal, (3) Punta Laguna, (4) Lago Chichancanab, (5) Costa de Puerto Rico, (6) Cariaco, (7) Andes venezolanos, (8) Chilibrillo, (9) Quelccaya, (10) Cordillera Blanca, (11) Lago Titicaca, (12) Charquini, (13) Lago Frías, (14) Patagonia.

dencias regionales y no apoyarse en definiciones generalizadas, con el fin de comprender las diversas respuestas producto de condiciones propias de cada región.

4.2. Imprecisión de las herramientas de datación

Una de las diferencias más notorias al tratar de definir la ocurrencia del MWP y la LIA la constituyen la estimación cronológica precisa de los mismos. La falta de sincronidad en la datación de estos períodos (Fig. 4) es efecto directo de las herramientas de datación para los registros utilizados, entre las cuales las fechas con radiocarbono presentan grandes fuentes de error para períodos recientes (**Rabatel et al.**, 2005). La falta de alta resolución temporal y control en las dataciones impiden detectar variaciones a escalas climáticas seculares y decadales (**Liu et al.**, 2005). Teniendo en cuenta las limitaciones de las diversas herramientas (U/Th en corales, dendrocronología, liquenometría, ^{14}C , entre otros) usadas para datar intervalos paleoclimáticos, se debería evitar el uso de términos descriptores como el Período Cálido Medieval y la Pequeña Edad de Hielo y reemplazarlos por la descripción de sus condiciones climáticas, y sus tiempos de ocurrencia en edades calendario (**Jones & Mann**, 2004).

4.3. Mecanismos reguladores paleoclimáticos

Los intervalos del MWP y la LIA se consideran fenómenos a escala hemisférica definidos a partir de los promedios de temperatura en el hemisferio norte (**Goosse et al.**, 2005). Sin embargo, cuando se comparan con las evidencias neotropicales se encuentran grandes diferencias, correspondiendo más a eventos paleoclimáticos cortos submilenarios que dificultan cualquier definición y caracterización a escala global. A la luz de los registros paleoclimáticos existentes en el Neotrópico para los últimos 2000 años, son claras las tendencias paleoclimáticas contrarias tanto para el MWP como para la LIA (Fig. 5). Tales efectos contrarios van desde la ocurrencia de una época húmeda durante la LIA para la Laguna Mucubaj en los Andes venezolanos, Lago Verde en Mesoamérica y el Lago Titicaca, contrastando con una época seca en el Istmo de Panamá, la Cuenca de Cariaco, la costa de Puerto Rico, y Aguada X'caamal en la Península de Yucatán. Si bien existen fuertes indicios que una disminución en la radiación solar influyó fuertemente en el avance glaciario (Fig. 2L), la consecuente disminución de la temperatura en los Andes venezolanos (**Polissar et al.**, 2006a) y el aumento en el nivel del Lago Verde. El efecto de una posición más austral de la ZCIT durante la LIA, ligada al fenómeno ENSO, habría tenido un efecto marcado en las condiciones secas presentes en el Mar Caribe y el Istmo.

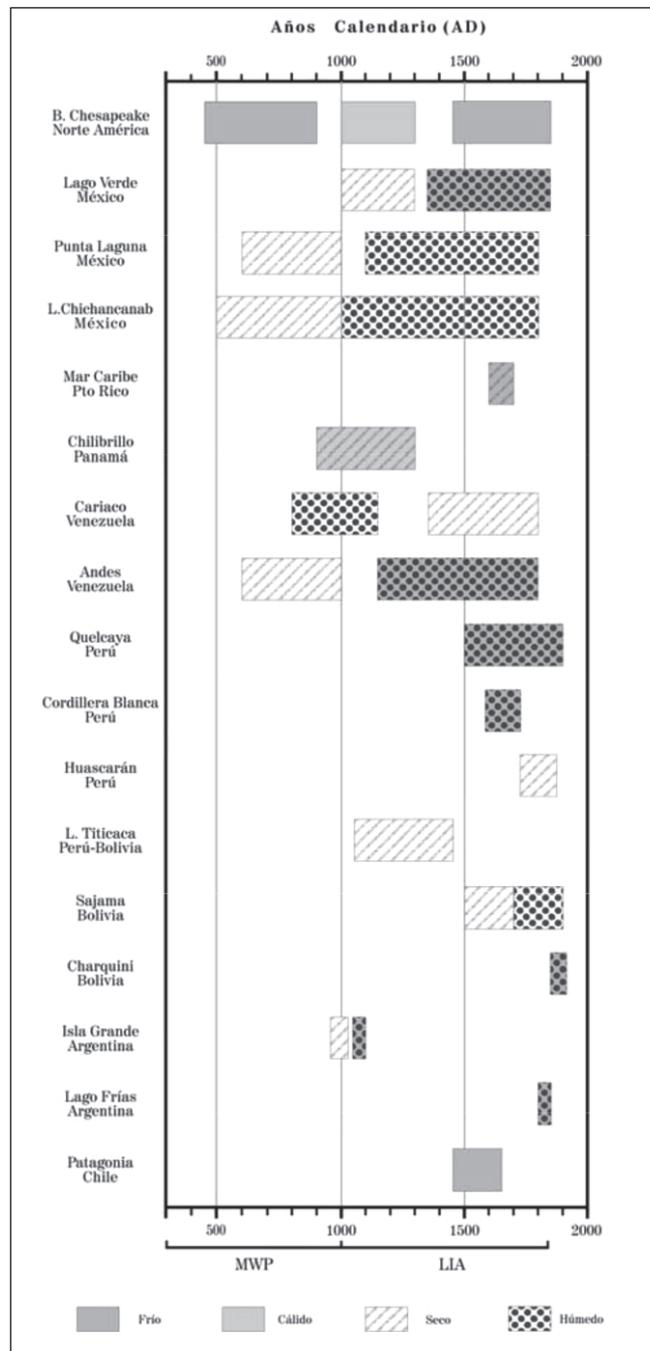


Figura 4. Representación de las condiciones paleoclimáticas y períodos correspondientes al Período Cálido Medieval (MWP) y la Pequeña Edad de Hielo (LIA) para los registros mencionados en el texto. Se muestran siete interpretaciones paleoclimáticas correspondientes a clima frío, cálido, seco, húmedo, cálido-seco, frío-seco y frío-húmedo. (Compilado de: **Thompson et al.**, 1986; **Rull et al.**, 1987; **Hodell et al.**, 1995; **Curtis et al.**, 1996; **Abbott et al.**, 1997; **Winter et al.**, 2000; **Haug et al.**, 2001; **Lachniet et al.**, 2001; **Rabatel et al.**, 2001; **Watanabe et al.**, 2001; **Cronin et al.**, 2003; **Hodell et al.**, 2005; **Liu et al.**, 2005; **Polissar et al.**, 2006a; **Ariztegui et al.**, 2007; **Harrison et al.**, 2007; **Lozano-García et al.**, 2007; **Solomina et al.**, 2007).



Figura 5. Síntesis de las condiciones paleoclimáticas en Meso y Suramérica durante los eventos del MWP y la LIA, para los registros mencionados en el texto. El MWP está indicado por los círculos rosa, mientras que la LIA por los círculos grises y blancos. Los símbolos indican condiciones secas y húmedas para cada evento (Compilado de: **Thompson et al.**, 1986; **Rull et al.**, 1987; **Hodell et al.**, 1995; **Curtis et al.**, 1996; **Abbott et al.**, 1997; **Winter et al.**, 2000; **Haug et al.**, 2001; **Lachniet et al.**, 2001; **Rabatel et al.**, 2001; **Watanabe et al.**, 2001; **Hodell et al.**, 2005; **Liu et al.**, 2005; **Polissar et al.**, 2006a; **Ariztegui et al.**, 2007; **Harrison et al.**, 2007; **Lozano-García et al.**, 2007; **Solomina et al.**, 2007).

La dificultad en la “globalización” paleoclimática se da porque si bien, estos eventos se encuentran asociados a mecanismos de modulación climática hemisférica, como modificaciones en la circulación termohalina (e.g. **Broecker**, 2000; **Bradley et al.**, 2003a), periodos de baja radiación solar y efectos del forzamiento volcánico (e.g. **Beer et al.**, 2000; **Polissar et al.**, 2006a; **Feynman**, 2007), el efecto de tales mecanismos no es el mismo en todas las regiones. Tal es el caso de los incrementos en la radiación solar que no causan calentamiento en todas las regiones (**Bradley et al.**, 2003b), o puede verse aumentado o disminuido por la interacción con mecanismos climáticos regionales e.g. la respuesta climática en Europa se acopla a modelos de circulación asociados a la Oscilación del Ártico (**Shindell et al.**, 2001), mientras que en el trópico la posición de la ZCIT y al efecto acoplado con el fenómeno ENSO produce contrastes marcados en la relación precipitación- evaporación (P-E; **Haug et al.**, 2001; **Lachniet et al.**, 2004; **Peterson & Haug**, 2006). Adicionalmente, eventos tipo El Niño caracterizados por la posición más austral de la ZCIT, producen modelos de precipitación en los trópicos y extra trópicos con un efecto de sequía global durante la LIA, que puede hacer que registros como los de la Cuenca de Cariaco ocurran en fase con el hemisferio norte (**Peterson & Haug**, 2006). Sin embargo, estos fenómenos climáticos y el sistema océano-atmósfera tropical también hacen única cada región, las cuales a su vez generan una diversidad de respuestas de retro-alimentación paleoclimáticas que pueden ser positivas o negativas. En los trópicos la nubosidad baja (estratos) produce un efecto termostático (e.g. **Clement et al.**, 1996).

4.4. Comparación entre los eventos MWP y LIA a escalas geográficas regional y global

La ocurrencia de respuestas climáticas particulares surge como efecto de condiciones climáticas regionales propias de las condiciones geográficas, bióticas e hidrográficas (e.g. tipo de vegetación, relieve, drenaje, altitud, latitud) de cada zona, produciendo respuestas geográficas variables al mismo mecanismo climático (**Lozano-García et al.**, 2007). Tal es el caso de respuestas climáticas divergentes entre las costas y los Andes tropicales a los mismos fenómenos climáticos (**Polissar et al.**, 2006a). Mientras que regiones en latitudes altas y condiciones geográficas similares como la región glaciar de Perú y Bolivia presentan respuestas climáticas acopladas, tanto en periodos de ocurrencia, como en las condiciones climáticas. (**Rabatel et al.**, 2005; **Solomina et al.**, 2007; **Jomelli et al.**, 2008). De aquí la importancia de evitar el uso de registros de áreas pequeñas para hacer inferencias hemisféricas (e.g. **Crowley & Lowery**, 2004), puesto que indicadores indivi-

duales presentan respuestas a diferentes aspectos climáticos estacionales, acercamientos multi-indicadores permitirán una visión más generalizada de los efectos y resultan más útiles (**Farrera et al.**, 1999).

Desde la perspectiva de los modelos y simulaciones bajo forzamiento se concluye que las variaciones climáticas a escala regional son mayores que a escala hemisférica (**Goosse et al.**, 2004). Este acercamiento permite considerar los diferentes escenarios en los cuales se han producido eventos climáticos como el MWP y la LIA. La posible modulación de condiciones tipo El Niño y La Niña (e.g. **Hughes & Díaz**, 1994), fases que no ocurren en el Atlántico Norte, lleva a tener en cuenta que dada la gran diversidad de condiciones ambientales regionales, múltiples factores bióticos y geográficos que ofrecen los trópicos, no es posible esperar respuestas climáticas lineales con los cambios hemisféricos y globales (**Lozano-García et al.**, 2007). Debido a su ubicación y complejidad geográfica los trópicos no responden pasivamente al cambio climático sino que es allí donde posiblemente se direccionan las tendencias climáticas globales (e.g. **Vecchi et al.**, 2008).

5. Perspectivas

El escenario complejo derivado de la reconstrucción paleoclimática, a partir del escaso número de registros sedimentarios existentes para el Neotrópico, resulta de una variedad de respuestas climáticas, las cuales se encuentran influenciadas por: (1) mecanismos acoplados océano-atmósfera del Atlántico Norte, (2) variaciones climáticas decadales del fenómeno ENSO, (3) la dinámica de la ZCIT, (4) regímenes de vientos del Pacífico (e.g. el Chorro del Chocó), (5) efectos orográficos por la orientación de los Andes del norte, (6) dinámica del Océano Pacífico y (7) transporte de humedad desde el Mar Caribe hacia el Océano Pacífico. De aquí que se hace necesaria la obtención de registros continentales y marinos de alta resolución, análisis multi-indicadores y correlaciones paleoclimáticas que permitan precisar la ocurrencia y la dinámica del MWP y la LIA, su relación con el fenómeno ENSO y sus posibles efectos globales. En el norte de Suramérica existe un gran potencial paleoclimático mediante el estudio de: (1) registros sedimentarios continentales como sucesiones lacustres en las llanuras y valles intermontanos en la Cordillera Occidental colombiana, llanuras tropicales del litoral pacífico, y estalagmitas en la cordilleras y regiones costeras, y (2) registros sedimentarios marinos de los márgenes continentales y corales del mar Caribe y el Océano Pacífico. Estos registros permitirían la comprensión del escenario paleoclimático de la MWP la LIA, los efectos de la dinámica paleoclimática a escalas anuales (e.g. fenóme-

nos ENSO y NAO), decadales (e.g. *Pacific Decadal Oscillation*, PDO), y centenales.

6. Conclusiones

Los episodios paleoclimáticos del Periodo Cálido Medieval y la Pequeña Edad de Hielo, aparentemente tuvieron repercusiones en el Neotrópico. Intervalos de sequía aguda en algunos puntos de Mesoamérica y norte de Suramérica y temperaturas superficiales oceánicas más bajas que las actuales en la Mar Caribe, sugieren teleconexiones con el hemisferio norte. Sin embargo, las evidencias actuales no permiten confirmar la extensión de intervalos globales de sequía y enfriamiento, de tal forma que los eventos del MWP y la LIA parecen tener solamente una utilidad limitada para describir cambios climáticos en términos de promedios de temperatura globales. En este planteamiento, la respuesta regional toma más fuerza, si tenemos en cuenta la sincronización existente en registros paleoclimáticos de zonas geográficas similares (e.g. zonas costeras, casquetes glaciares de los Andes tropicales centrales), resultando así una aparente dependencia: *variabilidad climática-variabilidad geográfica*. Adicionalmente, el efecto producido por fenómenos como la migración de la ZCIT, y el ENSO refuerzan los efectos climáticos regionales produciendo patrones climáticos contrarios entre el norte y algunas regiones de Suramérica. Dada la complejidad de los factores climáticos que modulan el clima tropical y la diversidad de respuestas, el modelo climático tropical presenta fenómenos regionales más importantes como el ENSO, los cuales pueden influenciar a mayor escala las temperaturas y tendencias climáticas hemisféricas y globales. Dada la localización privilegiada de Colombia se deben buscar registros sedimentarios de alta resolución. Tales registros posiblemente ocurren tanto en el continente como en el océano. Su estudio interdisciplinario es urgente si queremos comprender el funcionamiento del clima a escalas temporales más amplias que las de los registros históricos y contribuir así a la comprensión del cambio climático en nuestra región.

7. Agradecimientos

Esta contribución forma parte de la tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT, del primer autor. Agradecemos a la Fundación *Leverhulme Trust*, Inglaterra (Grant: ID20050769) por el apoyo económico. Agradecemos al Dr. Pratigya Polissar (Universidad del Estado de Pensilvania, EUA) por facilitarnos los datos de los Andes Venezolanos. A Brayan García y Gonzalo Parra por el diseño y trabajo gráfico. Los otros datos utilizados en la construcción de la figura 2 fueron tomados de la base de datos de la NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov>).

8. Bibliografía

- Abbott, M.B., Binford, M.W., Brenner, M., Kelts, K.R. 1997. A 3500 ¹⁴C yr high-resolution record of water-level changes in Lake Titicaca, Bolivia/Peru. *Quaternary Research* 47, 169-180.
- Ariztegui, D., Bösch, P., Davaud, E. 2007. Dominant ENSO frequencies during the Little Ice Age in Northern Patagonia: The varved record of proglacial Lago Frías, Argentina. *Quaternary International* 161, 46-55.
- Beer, J., Mende, W., Stellmacher, R. 2000. The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews* 19, 403-15.
- Binford, M.W., Kolata, A.L., Brenner, M., Janusek, J.W., Seddon, M.T., Abbott, M., Curtis, J.H. 1997. Climate variation and the rise and fall of an Andean civilization. *Quaternary Research* 47, 235-248.
- Bradley, R.S., Jones, P.D. 1993. 'Little Ice Age' summer temperature variations: their nature and relevance to recent global warming trends. *The Holocene* 3(4), 367-376.
- , Briffa, K.R., Cole, J., Hughes, M.K., Osborn, T.J. 2003a: The climate of the last millennium, En: Alverson, K., Bradley, R.S., Pedersen, T.F. (eds.), *Paleoclimate, Global Change and the Future*, Springer Verlag, Berlin, pp. 105-141.
- , Hughes, M.K., Diaz, H.F. 2003b. Climate in Medieval time. *Science* 302, 404-405.
- Broecker, W.S. 2000. Was a change in thermohaline circulation responsible for the Little Ice Age? *PNAS* 97(4), 1339-1342.
- Clark, P.U., Pisias, N.G., Stocker, T.F., Weaver, A.J. 2002. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature* 415, 863-869.
- Clement, A.C., Seager, R., Cane, M.A., Zebiak, S.E. 1996. An ocean dynamical thermostat. *Journal of Climate* 9, 2190-2196.
- Cook, E.R., Esper, J., D'Arrigo, R.D. 2004. Extra-tropical Northern Hemisphere land temperature variability over the past 1000 years. *Quaternary Science Reviews* 23, 2063-2074.
- Cronin, T.M., Dwyer, G.S., Kamiya, T., Schwede, S., Willard, D.A. 2003. Medieval Warm Period, Little Ice Age and 20th century temperature variability from Chesapeake Bay. *Global and Planetary Change* 36, 17-29.
- Crowley, T.J. 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289, 270-277.
- , Lowery, T.S. 2000. How warm was the Medieval Warm Period? *Ambio* 29, 51-54.
- Curtis, J.H., Hodell, D.A., Brenner, M. 1996. Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya cultural evolution. *Quaternary Research* 46, 37-47.
- Farrera, I., Harrison, S.P., Prentice I.C., Ramstein, G., Guiot, J., Bartlein, P.J., Bonnefille, R., Bush, M., Cramer, X., Grafenstein, U.-v., Holmgren, K., Hooghiemstra, H., Hope, G., Jolly, D., Lauritzen, S.E., Ono, Y., Pinot, S., Stute, M., Yu, G. 1999. Tropical climates at the Last Glacial Maximum: a new synthesis of terrestrial palaeoclimate data. I. Vegetation, lake-levels and geochemistry. *Climate Dynamics* 15, 823-856.

- Feynman, J.** 2007. Has solar variability caused climate change that affected human culture? *Advances in Space Research* 40, 1173-1180.
- Grabandt R.A.J.** 1980. Pollen rain in relation to arboreal vegetation in the Colombian Cordillera Oriental. *Review Paleobotany and Palynology* 29, 65-147.
- González, C., Dupont, L.M., Behling, H., Wefer, G.** 2008. Neotropical vegetation response to rapid climate changes during the last glacial period: Palynological evidence from the Cariaco Basin. *Quaternary Research* 69, 217-230.
- Goosse, H., Masson-Delmotte, V., Renssen, H., Delmotte, M., Fichefet, T., Morgan, V., van Ommen, T. Khim, K., Stenni, B.** 2004. A late medieval warm period in the Southern Ocean as a delayed response to external forcing? *Geophysical Research Letters* 31, L06203, doi:10.1029/2003GL019140.
- , **Renssen, H., Timmermann, A., Bradley, R.S.** 2005. Internal and forced climate variability during the last millennium: a model-data comparison using ensemble simulations. *Quaternary Science Reviews* 24, 1345-1360.
- Grove, J.M.** 2001. The initiation of the "Little Ice Age" in regions around the North Atlantic. *Climatic Change* 48, 53-82.
- Harrison, S., Winchester, V., Glasser, N.** 2007. The timing and nature of recession of outlet glaciers of Hielo Patagónico Norte, Chile, from their Neoglacial IV (Little Ice Age) maximum positions. *Global and Planetary Change* 59, 67-78.
- Haug, G.H., Hughen, K.A., Sigman, D.M., Peterson, L.C., Röhl, U.** 2001. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science* 293, 1304-1308.
- Hendy, E.J., Gagan, M.K., Alibert, C.A., McCulloch, M.T., Lough, J.M., Isdale, P.J.** 2002. Abrupt decrease in Tropical Pacific Sea surface salinity at end of Little Ice Age. *Science* 295, 1511-1514.
- Hodell, D.A., Brenner, M., Curtis, J.H., Guilderson, T.P.** 2001. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. *Science* 292, 1367-1370.
- , **Brenner, M., Curtis, J.H., Medina-González, R., Can, E. I.-C., Albornaz-Pat, A., Guilderson, T. P.** 2005. Climate change on the Yucatan Peninsula during the Little Ice Age. *Quaternary Research* 63, 109-121.
- , **Curtis, J.H., Brenner, M.** 1995. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. *Nature* 375, 391-394.
- Hughes, M.K., Díaz, H.F.** 1994. Was there a "Medieval Warm Period", and if so, where and when?. *Climatic Change* 26, 109-142.
- Jomelli, V., Grancher, D., Brunstein, D., Solomina, O.** 2008. Recalibration of the yellow Rhizocarpon growth curve in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for LIA chronology. *Geomorphology* 93, 201-212.
- Jones P.D., Mann, M.E.** 2004. Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics* 42, 1-42.
- , **Osborn, T.J., Briffa, K.R.** 2001. The evolution of climate over the last millennium. *Science* 292, 662-666.
- Keigwin, L.D., Boyle, E.A.** 2000. Detecting Holocene changes in thermohaline circulation. *PNAS* 97(4), 1343-1346.
- Lachniet, M.S., Burns, S.J., Piperno, D.R., Asmerom, Y., Polyak, V.J., Moy, C.M., Christenson, K.** 2004. A 1500-year El Niño/Southern Oscillation and rainfall history for the Isthmus of Panama from speleothem calcite. *Journal of Geophysical Research* 109, D20117, doi:10.1029/2004 JD004694.
- Liu, K.-b., Reese, C.A., Thompson, L.G.** 2005. Ice-core pollen record of climatic changes in the central Andes during the last 400 yr. *Quaternary Research* 64, 272-278.
- Lozano-García, M.S., Caballero, M., Ortega, B., Rodríguez, A., Sosa, S.** 2007. Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of eastern Mesoamerica. *PNAS* 104(41), 16200-16203.
- Mann, M.E., Cane, M.A., Zebiak, S.E., Clement, A.** 2005. Volcanic and solar forcing of the Tropical Pacific over the past 1000 years. *American Meteorological Society* 18, 447-456.
- Mauquoy, D., Blaauw, M., van Geel, B., Borromei, A., Quattrocchio, M., Chambers, F.M., Possnert, G.** 2004. Late Holocene climatic changes in Tierra del Fuego based on multiproxy analyses of peat deposits. *Quaternary Research* 61, 148-158.
- Peterson, L.C., Haug, G.H.** 2006. Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234, 97-113.
- Philander, F.G.H.** 1983. El Niño Southern Oscillation Phenomena. *Nature* 302, 295-301.
- Polissar, P.J., Abbott, M.B., Wolfe, A.P., Bezada, M., Rull, V., Bradley, R.S.** 2006a. Solar modulation of Little Ice Age climate in the tropical Andes. *PNAS* 103(24), 8937-8942.
- , **Abbott, M.B., Shemesh, A., Wolfe, A.P., Bradley, R.S.** 2006b. Holocene hydrologic balance of tropical South America from oxygen isotopes of lake sediment opal, Venezuelan Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 242, 375-389.
- Poveda, G., Waylen, P.R., 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.
- Rabatel, A., Jomelli, V., Naveau, P., Francou, B., Grancher, D.** 2005. Dating of Little Ice Age glacier fluctuations in the tropical Andes: Charquini glaciers, Bolivia, 16°S, C. R. *Geoscience* 337, 1311-1322.
- Rull, V., Salgado-Labouriau, M.L., Schubert, C., Valastro Jr., S.** 1987. Late Holocene temperature depression in the Venezuelan Andes: Palynological evidence. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 60, 109-121.
- Shindell, D.T., Schmidt, G.A., Mann, M.E., Rind, D., Waple, A.** 2001. Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum. *Science* 294, 2149-2152.
- Solomina, O., Jomelli, V., Kaser, G., Ames, A., Berger, B., Pouyaud, B.** 2007. Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: "Little Ice Age" moraine chronology. *Global and Planetary Change* 59, 225-235.
- Stocker, T.F., Marchal, O.** 2000. Abrupt climate change in the computer: Is it real?. *PNAS* 97(4), 1362-1365.

- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Bolzan, J.F., Koci, B.R.** 1985. A 1500-yr record of tropical precipitation in ice cores from the Quelccaya Ice Cap, Peru. *Science* 229, 971-973.
- , **Mosley-Thompson, E., Dansgaard, W., Grootes, P.M.** 1986. The Little Ice Age in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya ice cap. *Science* 234, 361-364.
- , **Mosley-Thompson, E., Davis, M.E., Lin, P.N., Henderson, K.A., Cole-Dai, J., Bolzan, J.F., Liu, K-B.** 1995. Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru. *Science* 269, 46-50.
- Turney, C.S.M., Palmer, J.G.** 2007. Does the El Niño–Southern Oscillation control the interhemispheric radiocarbon offset?. *Quaternary Research* 67, 174-180.
- Unkel, I., Kadereit, A., Mächtle, B., Eitel, B., Kromer, B., Wagner, G., Wacker, L.** 2007. Dating methods and geomorphic evidence of palaeoenvironmental changes at the eastern margin of the South Peruvian coastal desert (141300S) before and during the Little Ice Age. *Quaternary International* 175, 3-28.
- Vecchi, G.A., Clement, A., Soden, B.J.** 2008. Examining the Tropical Pacific response to global warming. *EOS* 89(9), 81-83.
- Watanabe, T., Winter, A., Oba, T.** 2001. Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in corals. *Marine Geology* 173, 31-35.
- Winter, A., Ishioroshi, H., Watanabe, T., Oba, T., Christy, J.** 2000. Caribbean sea surface temperatures: two-to-three degrees cooler than present during the Little Ice Age, *Geophysical Research Letters* 27(20), 3365-3368.

Recibido: julio 15 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2009.

LA HISTORIA CENOZOICA DEL FENÓMENO DE EL NIÑO

Por

José Ignacio Martínez R.*

Resumen

Martínez R, J. I.: La historia cenozoica del fenómeno de El Niño. Rev. Acad. Col. Cienc. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33** (129): 491-511, 2009. ISSN 0370-3908.

Durante la era Cenozoica cuatro intervalos de tiempo: el Eoceno temprano (~50 Ma), el Plioceno temprano (~5-3 Ma), el último glacial máximo (~20 ka) y el Holoceno (<10 ka), han sido examinados en detalle en un esfuerzo para entender el fenómeno de El Niño bajo diversas condiciones frontera. Para el Eoceno y Plioceno tempranos se argumenta la posible existencia de condiciones permanentes tipo - El Niño, mientras que para el último glacial las evidencias de condiciones tipo - El Niño o La Niña son aun contradictorias. Solo para el Holoceno (después de ~6.6 ka) se reconoce el inicio del fenómeno de El Niño en su frecuencia actual, como también su posible relación con mecanismos forzantes como la radiación solar y la actividad volcánica. Se discuten las evidencias paleoceanográficas y continentales del fenómeno, así como también su posible relación con pulsos orogénicos en el norte de Suramérica.

Palabras clave: fenómeno de El Niño, paleoclimatología, Cenozoico, Eoceno temprano, Plioceno temprano, último glacial, Holoceno, relación clima – tectónica.

Abstract

During the Cenozoic era four time intervals: the early Eocene (~50 Ma), the early Pliocene (~5-3 Ma), the last glacial maximum (~20 ka), and the Holocene (<10 ka) have been examined in an effort to understand El Niño phenomenon under diverse boundary conditions. For the early Eocene and Pliocene periods the possible existence of permanent El Niño-like conditions have been proposed, whereas for the last glacial maximum evidences of either, El Niño-like or La Niña-like conditions are contradictory. Only for the Holocene (after ~6.6 ka) the El Niño phenomenon in its present frequency is recognized, as well as its possible relation with forcing mechanisms such as solar radiation and volcanic activity. The paleoceanographic and continental evidences of El Niño phenomenon are discussed, as well as their possible relation with orogenic pulses in northern South America.

Key words: El Niño phenomenon, paleoclimatology, Cenozoic, early Eocene, early Pliocene, last glacial, Holocene, climate – tectonics relation.

* Departamento de Geología, Área de Ciencias del Mar, Universidad EAFIT, A.A. 3300 Medellín. Correo electrónico: jimartin@eafit.edu.co

1. Introducción

El ascenso de la temperatura superficial del Océano Pacífico oriental, y el colapso de las comunidades en el sistema de surgencia de la Corriente de Humboldt y la lengua fría cada 2 a 7 años son hechos reconocidos posiblemente desde tiempos precolombinos. Sin embargo su registro sistemático solo ocurre desde la Colonia cuando es bautizado como fenómeno de El Niño por su aparición repentina hacia finales del año (e.g. **Quinn et al.**, 1987; **Ortlieb** 2000). La relación entre el fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur, o la diferencia de presión atmosférica entre Darwin (Australia) y Hawai, fue reconocida primero por **Bjerknes** (1969). De aquí el término ENSO (*El Niño – Southern Oscillation*) para describir este sistema acoplado atmósfera-oceano (e.g. **Philander** 1983). El fenómeno ENSO es altamente dinámico y comprende tres fases: normal, La Niña y El Niño. Durante las fases normales y de La Niña los vientos Alisios del noreste y sureste, que se juntan a lo largo de la zona de convergencia intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés), son intensos y acumulan agua caliente en el Océano Pacífico occidental (WEP por sus siglas en inglés). Esta es la llamada “piscina caliente” cuya temperatura superficial supera los 28°C y cuya termoclina ocurre a 200 m. A diferencia del Océano Pacífico oriental (EEP), y la lengua fría, donde la temperatura superficial es de 18°C y la termoclina es <50 m. La fase de La Niña se mantiene hasta que la piscina caliente alcanza una condición de desequilibrio, bien sea por la debilitación de los vientos Alisios o por el exceso de altura estérica de la misma, i.e. la diferencia en altura topográfica de la piscina caliente con respecto al EEP. Es entonces cuando se produce el desplazamiento zonal de la piscina caliente hacia el EEP y se alcanza la fase de El Niño. Bajo esta condición la temperatura superficial en el EEP excede los 20°C y la termoclina alcanza >50 m de profundidad. De acuerdo con el mecanismo de retroalimentación zonal de **Bjerknes** (1969) podríamos imaginar un escenario inicial carente de cualquier gradiente de temperatura oeste-este (zonal) y por tanto una termoclina uniforme. Con la más mínima aparición de un gradiente zonal de temperatura los vientos Alisios se intensificarían forzando así la acumulación de agua caliente en el WEP. Un mecanismo de retroalimentación análogo sucede durante la fase de El Niño y estaría controlado por la existencia de un oscilador retrasado (*delayed oscillator*) en el Océano Pacífico central, responsable de la inversión de los vientos y luego de su retorno a condiciones normales (**Battisti & Hirst** 1989).

En las regiones de mayor temperatura superficial la evaporación es alta, de tal forma que se forman complejos

convectivos que resultan en abundante precipitación. Por consiguiente la región de mayor precipitación ocurre en el WEP durante la fase de La Niña y en el Océano Pacífico central y el EEP durante la fase de El Niño. Es decir, la circulación atmosférica zonal (Walker) se debilita durante la fase de El Niño. Por efectos de la radiación solar, las temperaturas superficiales en la piscina caliente aumentan linealmente con la nubosidad hasta que alcanzan los 28°C. En este punto la cobertura de nubes es tal que la influencia de la radiación solar es mínima (**Ramanathan & Collins** 1991). Este efecto termostático fue posteriormente entendido como un mecanismo de retroalimentación en el que participaría todo el Pacífico tropical (**Clement et al.**, 1996) y las aguas profundas jugarían un papel importante (**Sun**, 2000). Aparentemente existirían dos regímenes en el EEP a escalas de los miles de años, uno cálido y permanente, y otro frío en el que se alternarían las fases de El Niño y La Niña (**Sun** 2000). A esto se suma el fenómeno multidecadal (entre 20 y 30 años) conocido como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en Inglés) y que es considerado como un fenómeno de El Niño extendido (e.g. **Mantua et al.**, 1997).

En el norte de Suramérica el fenómeno del ENSO se hace sentir a través de la dinámica del Chorro del Chocó, corriente atmosférica baja que resulta del desvío hacia el este, por el efecto de Coriolis, de los vientos Alisios del sureste una vez estos cruzan la línea ecuatorial. Su intensidad está determinada por el gradiente meridional (norte – sur) de SSTs a lo largo del EEP (**Poveda & Mesa** 2000; **Poveda** 2001). El Chorro del Chocó, como otros sistemas convectivos tropicales, es altamente sensible a los cambios de SST y de ahí al cambio climático regional o global (cf. **Chiang** 2009).

Durante la última década se ha reconocido el papel que juegan los trópicos como regiones controladoras del clima global (e.g. **Cane** 1998; **Chiang** 2009), y dentro de este contexto por supuesto que es el fenómeno del ENSO el que ha ocupado la mayor atención. A pesar de esto aún persisten numerosas preguntas con respecto a su magnitud, extensión espacial, inicio, duración y terminación de cada fase (e.g. **Allan** 2000), así como de sus teleconexiones globales (e.g. **Hoerling & Kumar** 2000). Similarmente se reconoce a la dinámica de la cinta transportadora del Atlántico Norte como el mecanismo responsable de cambios climáticos abruptos amplificadas en los trópicos a través del fenómeno del ENSO (e.g. **Clement et al.**, 2007; **Chiang**, 2009) y lo opuesto, que el fenómeno del ENSO afecte la dinámica de la cinta (**Schmittner et al.**, 2000). En ambos casos es el balance de precipitación-evaporación el que determina las diferencias de salinidad

entre los dos océanos, Atlántico y Pacífico, y la dinámica del fenómeno del ENSO en el Océano Pacífico.

De lo anterior, el reconocimiento de las fases extremas del fenómeno del ENSO en el pasado está basado en la reconstrucción de: (1) los gradientes de las temperaturas superficiales (SST) tanto zonales entre el WEP y el EEP, como meridionales entre la lengua fría y la Cuenca de Panamá en el EEP y, (2) la posición media de la ITCZ que ocurre en una posición más austral (septentrional) durante la fase de El Niño (La Niña).

Los indicadores (*proxies*) utilizados en tales reconstrucciones incluyen: (1) análisis estadísticos multivariados, i.e. funciones de transferencia y análogos modernos (MAT) en asociaciones de microfósiles planctónicos (foraminíferos, coccolitofóridos y radiolarios), (2) geoquímica inorgánica, i.e. Mg/Ca en las conchillas de foraminíferos y Sr/Ca en corales, y (3) geoquímica orgánica en los sedimentos, i.e. alkenonas o U_{37}^k . A pesar del perfeccionamiento cada vez mayor de estas técnicas, su grado de precisión en el Cuaternario varía entre 1 y 2.2°C (proyecto **MARGO** 2009). Las reconstrucciones de las SSTs por medio de Mg/Ca y Sr/Ca pueden estar sesgadas por efectos de disolución del carbonato en aguas profundas (e.g. **Barker et al.**, 2005; **Mekik & Francois** 2007; **Dekens et al.**, 2008) y por la fisiología de las zooxantelas simbióticas (**Cohen et al.**, 2002), respectivamente; mientras que la producción de alkenonas aparentemente responde a controles estacionales, de salinidad y surgencia (e.g. **Bendle & Roselle-Mele** 2004; **Niebler et al.**, 2003; **Kucera et al.**, 2005). En complemento a las reconstrucciones de las SSTs, los porcentajes de abundancia de especies de foraminíferos planctónicos agrupados según su hábitat en la columna de agua, i.e. someros (<50 m), intermedios (50–100 m) y profundos (>100 m), son empleados como indicadores de la profundidad de la termoclina (e.g. **Martínez et al.**, 1999). Similarmente, isótopos de nitrógeno ($\delta^{15}N$) y oxígeno ($\delta^{18}O$) han sido usados en la reconstrucción de la nutriclina/temoclina (**Kienast et al.**, 2008) y la termoclina (**Leduc et al.**, 2009), respectivamente.

Por otra parte, la reconstrucción del balance de precipitación-evaporación (P-E) es posible mediante la sustracción de la señal de la SST (obtenida a partir de los métodos arriba mencionados) de la señal de isótopos de oxígeno ($\delta^{18}O$) en foraminíferos planctónicos, la cual responde esencialmente a los cambios del volumen de hielo en los casquetes polares (e.g. **Martínez et al.**, 1997). Para intervalos de tiempo discretos, los registros de $\delta^{18}O$ en corales y estalagmitas, y medidas de Sr/Ca en los primeros proveen señales de alta resolución (e.g. **Beck et al.**,

1992; **Corrège et al.**, 2000; **Cobb et al.**, 2003, **Cruz et al.**, 2009).

Las evidencias continentales del fenómeno ENSO en el pasado están basadas en el presupuesto que sus teleconexiones globales habrían sido análogas al presente. Este no es necesariamente el caso, cuando las condiciones frontera tales como la paleogeografía, contenidos de gases de invernadero, cobertura de hielo y nubes, albedo y radiación solar, entre otras, habrían sido diferentes (e.g. **Markgraf & Díaz** 2000).

Las evidencias continentales incluyen: (1) datos palinológicos, (2) datos geoquímicos, i.e. la relación C_3/C_4 producto de la abundancia relativa de gramíneas y bosques, y (3) evidencias geológicas tales como la presencia de capas rojas, carbones y sucesiones laminadas lacustres, entre otras (e.g. **Parrish** 1998).

En los registros oceánicos es posible reconstruir el balance hídrico del continente mediante el análisis de elementos de origen terrígeno, i.e. Ti, Al y Fe. Sin embargo la actividad tectónica y su relación compleja con el clima impiden una separación clara entre estos dos efectos, en particular en márgenes continentales activas.

Por último, los modelos de circulación oceánica global (GCM) y modelos acoplados océano-atmósfera (OGCM; e.g. **Zebiak & Cane** 1987; **Crowley & North** 1991; **Parrish** 1998; **Archer** 2007), –alimentados por condiciones frontera derivadas del registro geológico–, proveen una visión sinóptica regional que permite contextualizar las reconstrucciones paleoclimáticas. Como condiciones fronteras se destacan la paleogeografía, la concentración de gases de invernadero (CO_2 , CH_4 y vapor de agua), y la nubosidad. Las concentraciones de CO_2 y CH_4 son derivadas de medidas de isótopos de boro ($\delta^{11}B$) en foraminíferos, isótopos de carbono ($\delta^{13}C$) en materia orgánica y medidas directas en núcleos de hielo (e.g. **Berner** 2004).

Presumiblemente durante los periodos cálidos es de esperarse o bien una dinámica mayor del fenómeno del ENSO, o incluso escenarios permanentes tipo – El Niño. La interpretación de escenarios permanentes requiere tanto de presupuestos con respecto a ajustes del sistema océano-atmósfera en el Océano Pacífico, como de sucesiones sedimentarias de alta resolución.

En este trabajo se presenta una revisión de las evidencias del fenómeno del ENSO en el Cenozoico con énfasis en el neotrópico y en los registros oceánicos de los mares adyacentes. Del mayor interés son las recons-

trucciones paleoclimáticas del Eoceno temprano y del Plioceno temprano, considerados como posibles análogos de escenarios climáticos futuros inducidos por acciones antrópicas. Sin embargo, dado que las condiciones frontera durante los últimos miles de años son mejor conocidas, la historia de la variabilidad del fenómeno ENSO durante el último glacial máximo (LGM por sus siglas en inglés) y el Holoceno son del mayor interés en conexión con mecanismos de forzamiento como los contenidos de CO_2 , CH_4 , y actividad volcánica, entre otros. En cualquier caso, son los registros de alta resolución los que permiten una mejor aproximación al entendimiento de la variabilidad del fenómeno del ENSO, ya que en caso contrario solo es posible obtener información sobre los modos climáticos operantes en cada tajada de tiempo (cf. **Trenberth & Otto-Bliesner 2003**; **Rosenthal & Broccoli 2004**).

2. El máximo climático del Eoceno: Las primeras evidencias del fenómeno ENSO en la era Cenozoica

Reconstrucciones de las SSTs para el óptimo climático del Eoceno temprano (52 a 50 Ma) son las más altas de todo el Cenozoico y habrían alcanzado latitudes altas (e.g. **Zachos et al., 2001**). Para el neotrópico, evidencias de condiciones cálidas y húmedas durante el Eoceno están soportadas por la presencia de *Malpighiaceae*, *Alchornea* y *Podocarpus* (**van der Hammen & Hooghiemstra 2000**) y la alta diversidad del bosque tropical (e.g. **Jaramillo et al., 2006**).

Bajo un escenario de calentamiento global generalizado sería de esperarse que la fase de El Niño habría adquirido un carácter permanente, hipótesis que **Huber & Caballero (2003)** pusieron a prueba. El escenario esperado, sin embargo, habría sido más un fenómeno permanente tipo – El Niño (*El Niño-like*) debido a la ausencia de registros marinos de alta resolución capaces de captar la variabilidad climática a escalas anuales para el Eoceno. La hipótesis del escenario tipo – El Niño permanente es cuestionado sobre las bases de modelos de circulación oceánica global (GCM) y el análisis espectral de sedimentos laminados lacustres de Wyoming y Alemania (Fig. 1; **Huber & Caballero 2003**). Los GCMs no muestran evidencias de una termoclina uniforme a lo largo del Océano Pacífico ecuatorial propia de una condición permanente del fenómeno de El Niño, como tampoco el análisis espectral de los sedimentos lacustres muestra diferencias con el Holoceno. Es decir se habrían alternado en forma cuasi-periódica las fases de El Niño y La Niña (**Huber & Caballero 2003**).

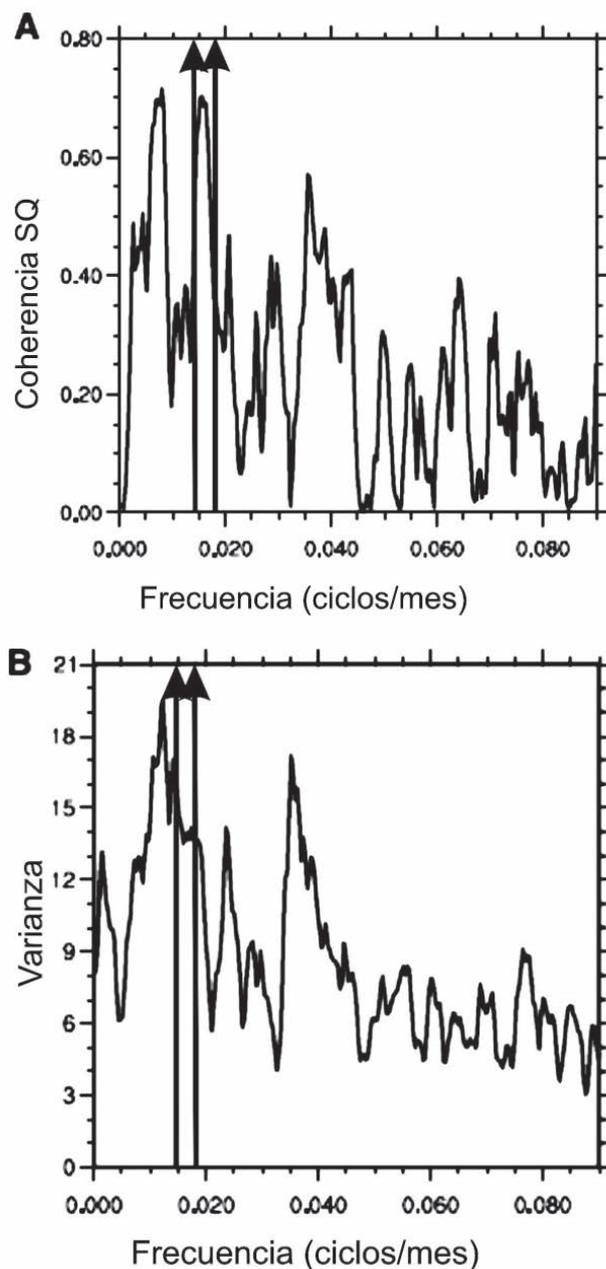


Figura 1. Modelación de la temperatura (línea continua) y picos dominantes del análisis espectral de sucesiones lacustres laminadas (flechas) del Eoceno de Wyoming y Alemania. Note la excelente coherencia entre la frecuencia del fenómeno ENSO (**Huber & Caballero 2003**).

A pesar del interés de los registros laminados de Wyoming y Alemania como posibles evidencias de las teleconexiones del fenómeno del ENSO, es en el neotrópico donde se deberían localizar y estudiar registros de alta resolución, preferiblemente laminados, tanto marinos como continentales. Sin embargo, el modo de

operación de las teleconexiones del fenómeno del ENSO no tendría que haber sido análogo al actual bajo condiciones frontera diferentes, e.g. una paleogeografía dominada por la conexión libre entre los Océanos Pacífico y Atlántico, y Mediterráneo e Indico.

3. ¿Modos climáticos tipo El Niño (*El Niño-like*) o La Niña (*La Niña-like*) durante el Plioceno temprano?

3.1. Evidencias paleoceanográficas

El Plioceno fue un periodo cálido que antecedió al desarrollo de las glaciaciones del Cuaternario (e.g. **Draut et al.**, 2003). Se caracterizó por una temperatura promedio global 3°C mayor que durante el Holoceno, la ausencia de glaciares en el hemisferio norte, un nivel del mar ~25 m más alto y una paleogeografía ligeramente diferente a la actual (e.g. **Fedorov et al.**, 2006). Las evidencias paleoceanográficas sugieren que el Océano Pacífico ecuatorial se habría caracterizado por una termoclina uniforme, y la ausencia de la lengua fría, lo que sugiere una condición permanente tipo – El Niño durante el Plioceno temprano (~4.6-3.1 Ma; e.g. **Cannariato & Ravelo** 1997; **Chaisson & Ravelo** 2000; **Molnar & Cane** 2002; **Wara et al.**, 2005; **Ravelo et al.**, 2004, 2006). Tal interpretación se basa en los patrones, y diferencias, de los contenidos porcentuales de foraminíferos planctónicos agrupados de acuerdo con su hábitat en la columna de agua, las curvas de isótopos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) de foraminíferos planctónicos de la piscina caliente (WEP) y el Océano Pacífico oriental (EEP) y el registro del polvo eólico en el EEP (Fig. 2a; **Chaisson & Ravelo** 2000; **Wara et al.**, 2005, **Ravelo et al.**, 2006; **Lawrence et al.**, 2006). **Dekens et al.** (2007) sugieren que a diferencia del Cuaternario la surgencia oceánica habría sido cálida ya que las reconstrucción de las SSTs, basadas en Mg/Ca y U^{k}_{37} , indican que las aguas de los sistemas de surgencia de California, el EEP y Perú habrían sido entre 3 y 9°C más altos durante el Plioceno temprano (4.6 a 3.1 Ma). Similarmente, **Fedorov et al.** (2006) exploran los mecanismos responsables de tal condición permanente y sugieren que la somerización de la termoclina en el EEP y el aumento del gradiente zonal de SSTs habría alcanzado un valor límite hace 3 Ma como resultado de la reducción del gradiente de densidad entre las latitudes altas y bajas por efectos de la reducción de la salinidad en las primeras.

El tamaño mayor del polvo eólico en el EEP durante el Plioceno temprano indicaría que los vientos Alisios habrían sido más intensos (**Hovan** 1995), sin embargo aparentemente la presencia de una región fuente árida también parece ser una condición importante. **Molnar &**

Cane (2002) sugieren que ésta estaría localizada en el norte de Suramérica e incluso la cuenca amazónica. Este no parece ser el caso cuando para ese entonces los Andes ya constituían una barrera importante (e.g. **Hoorn et al.**, 1995). Diferente es el caso del Plioceno medio cuando habría ocurrido una condición más afín a La Niña (e.g. **Molnar & Cane** 2002).

Alternativamente, **Rickaby & Halloran** (2005), con base en la reconstrucción Mg/Ca de las SSTs en *Globigerinoides sacculifer* en los dos extremos del Océano Pacífico, sugieren que habría existido una condición tipo – La Niña durante el Plioceno temprano. Interpretación que es cuestionada debido a la baja resolución de su estudio y al mayor volumen de información a favor de un escenario tipo – El Niño (e.g. **Ravelo et al.**, 2006; **Fedorov et al.**, 2006).

A la baja resolución estratigráfica de los estudios paleoceanográficos hay que agregar la complejidad introducida por la formación del Istmo de Panamá cuyos efectos se habrían hecho sentir sobre la reorganización de la circulación oceánica en el EEP y el balance de la salinidad superficial entre los Océanos Atlántico y Pacífico (e.g. **Keigwin** 1982; **Duque-Caro** 1990; **Ibaraki** 1997; **Haug et al.**, 2001; **Steph et al.**, 2005, 2006). Antes de 5.3 Ma el flujo de agua superficial se dirigía del Océano Atlántico al Pacífico, condición que luego se reversó con la restricción del istmo de Panamá entre 4.7 y 4.2 Ma (**Steph et al.**, 2006). La localización más septentrional o austral de la ITCZ es sugerida con base en la reducción de los casquetes polares del hemisferio norte (**Flohn** 1981), o a la migración al sur de la zona de acumulación máxima de ópalo en el EEP (e.g. **Farrell et al.**, 1995), respectivamente. La última interpretación estaría más acorde con una condición permanente de El Niño, sin embargo las evidencias paleoceanográficas en el Caribe son contradictorias (**Steph et al.**, 2006).

Evidencias paleontológicas del inicio de la surgencia fría del Perú y la lengua fría no están restringidas a registros de foraminíferos recuperados de núcleos de aguas profundas del EEP. De interés son los registros de acumulaciones de cirrípedos (*Coronula diadema*) parásitos de la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) en las Formaciones Canoa y Tablazo del Plioceno superior del Ecuador, cuya ocurrencia estratigráfica es un indicativo de la posición septentrional de la Corriente de Humboldt. El fundamento de esta interpretación se basa en la observación que la ballena jorobada, que habita la Corriente de Humboldt, migra en busca de la isoterma de los 25°C para reproducirse (**Bianucci et al.**, 2006). Otras

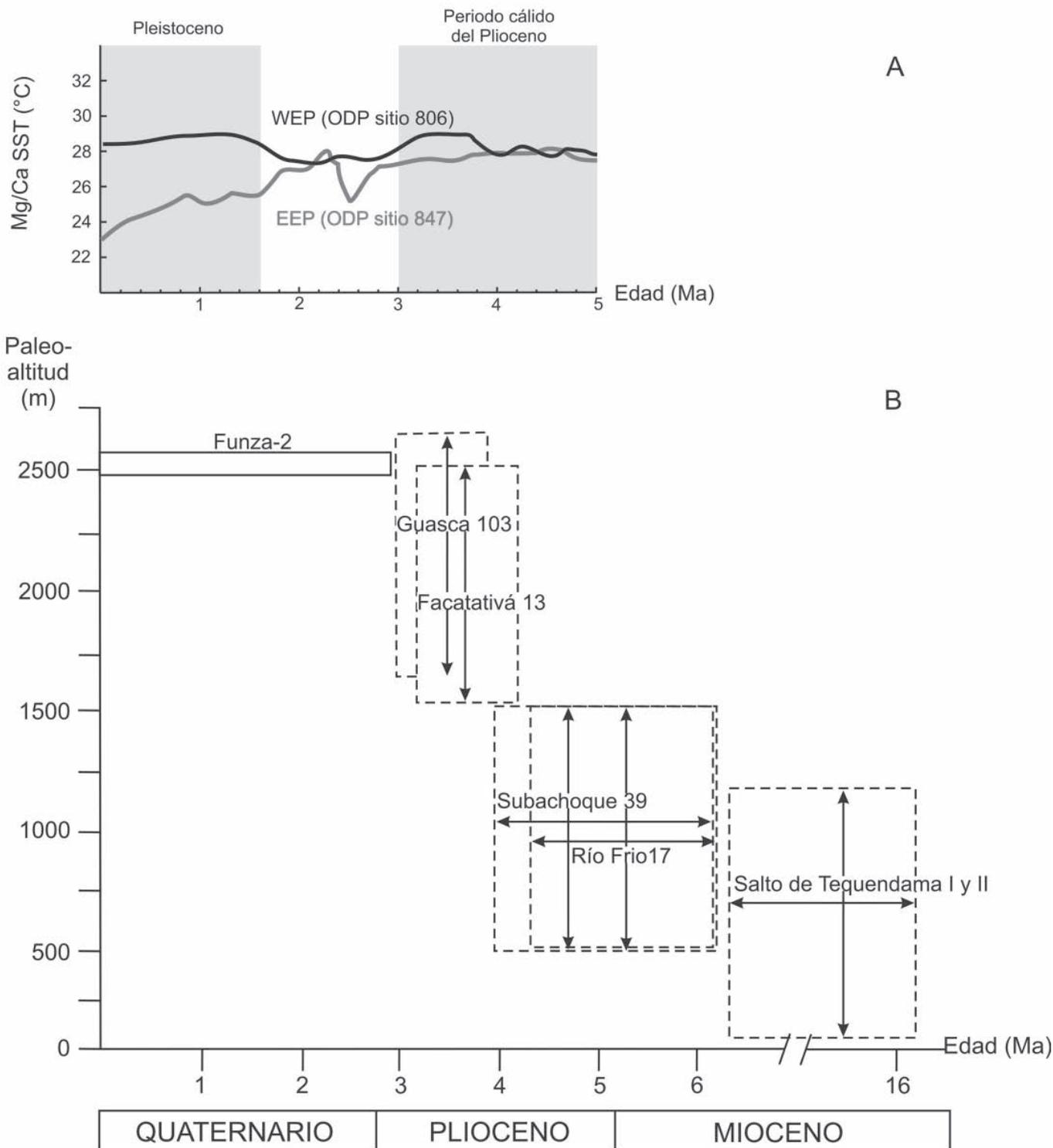


Figura 2. El intervalo cálido del Plioceno y el ascenso de la Cordillera Oriental. (a) Reconstrucción de la temperatura superficial del océano (SST) entre el extremo oeste (WEP) y este (EEP) del Pacífico con base en la relación Mg/Ca en foraminíferos planctónicos (Ravelo *et al.*, 2006), (b) altura (m) versus edad del orogeno de la Cordillera Oriental (Mora *et al.*, 2008). Note la divergencia de SSTs durante el Plioceno tardío y la correspondencia entre los dos registros.

evidencias del patrón de enfriamiento entre el Plioceno temprano y tardío incluyen la documentación de la reducción en el porcentaje de abundancia de los foraminíferos planctónicos de aguas cálidas en el norte de Suramérica (Ibaraki 1997) y de la evolución del género *Turritella* en Chile a partir de ~3 Ma (Tsuchi 2002). *Turritella* es un gasterópodo característico de sistemas de surgencia (Allmon 1988; Teusch *et al.*, 2002), de ahí su utilidad como indicador de la dinámica de la Corriente de Humboldt. De las anteriores observaciones es evidente que una mejor documentación estratigráfica de las unidades costeras pliocenas del norte de Suramérica es requerida para evaluar el inicio y la dinámica del sistema de surgencia del Perú, i.e. la condición tipo – La Niña. En Colombia son de interés las unidades costeras de Nariño.

3.2. Evidencias continentales

Las evidencias continentales incluyen ocurrencias palinológicas, micropaleontológicas (ostrácodos y diatomeas) y macropaleontológicas (vertebrados y moluscos). Estas muestran un patrón de precipitación y temperatura análogo al de las teleconexiones del fenómeno del ENSO en el presente, excepto por los patrones anómalos de precipitación y temperatura en regiones como el Golfo de México, la India y Australia (Molnar & Cane 2002); discrepancias que son explicadas por comparación con el evento del ENSO de 1997/98, el más fuerte y anómalo de los últimos 100 años, y la PDO (Molnar & Cane 2007). Es evidente, por tanto, que aún se desconocen muchos aspectos de cómo funcionan las teleconexiones de los fenómenos ENSO y PDO bajo condiciones frontera diferentes al presente.

3.3. Modelos de circulación global del océano y la atmósfera

Usando como condición frontera un escenario permanente de El Niño para el Plioceno temprano, Barreiro *et al.* (2005) aplican un modelo del océano (GCM) y postulan que con el colapso de la circulación Walker se habrían reducido la proporción de nubes estratos y el albedo en la región ecuatorial, al tiempo que habrían aumentado la humedad atmosférica y la temperatura global. Alternativamente Haywood *et al.* (2007), aplicando un modelo acoplado atmósfera–océano (AGCM), muestran que el escenario permanente de El Niño no es evidente a pesar que se observa un incremento en las SSTs en el EEP comparable al suministrado por los indicadores geológicos.

Del mayor interés es la interpretación de Tziperman & Farrell (2009), quienes sugieren que condiciones más cálidas provocarían mayor convección atmosférica, lo que

resultaría en la propagación más dinámica de las ondas Rossby atmosféricas, o planetarias de la estratosfera, que se desplazan hacia el este, y con esto un flujo (momento) mayor de los vientos del oeste, los que se opondrían a los vientos Alisios reduciendo así la profundidad de la termoclina y el gradiente de temperatura zonal del Pacífico.

4. El fenómeno del ENSO durante el Cuaternario

Para el periodo Cuaternario son de particular interés las reconstrucciones del fenómeno del ENSO durante la transición del Pleistoceno medio (hace 850 ka), el último interglacial (hace 125 ka), y el último glacial máximo (LGM, hace ~20 ka). El primero por constituir la transición entre la modulación por la radiación solar, sobre los ciclos glaciales-interglaciales, de la inclinación (cada 41.000 años) a la excentricidad (cada 100.000 años). La segunda por constituir un condición de alguna forma análoga al interglacial actual y la tercera por que éste intervalo de tiempo constituye un escenario opuesto al presente, i.e. contenidos más bajos de CO₂ (200 ppm), nivel del mar 120 m más bajo y extensión máxima de los casquetes polares (e.g. Bradley 1999). La reconstrucción precisa del fenómeno ENSO para el LGM, sin embargo, solo es posible en la medida en que podamos reconstruir precisamente las SSTs, la relación P-E y la posición media de la ITCZ, entre otros.

4.1. El fenómeno del ENSO en la transición del Pleistoceno medio

La reconstrucción de las SSTs, a partir de la relación Mg/Ca en foraminíferos planctónicos, en los núcleos MD97-2140 (WEP) y ODP846 (EEP) sugiere condiciones relativamente constantes en la piscina caliente en comparación con el EEP donde la SST habría descendido ~2°C durante el Pleistoceno medio. De tal forma que en la transición del Pleistoceno medio, hasta el último interglacial, la diferencia zonal de SSTs habría sido >4°C. Este patrón es interpretado como el paso de una condición tipo – El Niño durante el Pleistoceno temprano, a tipo – La Niña durante el Pleistoceno tardío (de Garidel-Thoron *et al.*, 2005).

4.2. El fenómeno del ENSO durante el último interglacial

Evidencias del fenómeno de El Niño han sido documentadas en gran detalle en la sucesión de terrazas coralinas de Papua Nueva Guinea para los últimos 130 ka (Hughen *et al.*, 1999; Tudhope *et al.*, 2001). Los registros isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$) y de Sr/Ca fueron analizados en tajadas

decadales de tiempo en las que se evidencia: (1) la influencia de los monzones, (2) la respuesta a la relación P-E, y (3) la frecuencia de ambas señales en forma análoga al fenómeno del ENSO actual (**Hughen et al.**, 1999). A pesar que las tajadas de tiempo estudiadas son tan breves (<90 años) para captar el rango completo de variabilidad paleoclimática, sí se demuestra la existencia del fenómeno del ENSO y su posible debilitamiento durante los estadios glaciales (**Tudhope et al.**, 2001; **Cane**, 2005).

4.3. El fenómeno del ENSO durante el LGM

4.3.1. Evidencias paleoceanográficas

El proyecto **CLIMAP** (1978), que tuvo por objeto la reconstrucción de las SSTs con base en análisis multivariados de asociaciones de protistas planctónicos, sentó las bases de una extensa discusión acerca de las condiciones paleoclimáticas operantes durante el LGM. Sorprendentemente las reconstrucciones de **CLIMAP** (1978) mostraron un océano tropical en el que las SSTs no habrían descendido más de 2°C, contradiciendo evidencias continentales de un descenso de la temperatura del orden de los 5° a 6°C (e.g. **Stute et al.**, 1995). Esta aparente insensibilidad de los trópicos a las variaciones orbitales que forzan los ciclos glaciales–interglaciales tuvo un doble efecto: (1) concentró el interés de la comunidad científica sobre el Atlántico Norte y la dinámica de la cinta transportadora y, (2) estimuló la búsqueda de nuevos indicadores de paleotemperatura. La hipótesis que el trópico sea el controlador del clima global y no precisamente el Atlántico Norte fue sugerida por **Cane** (1998). A pesar de que durante las dos últimas décadas el método de funciones de transferencia del proyecto **CLIMAP** (1978), ha sido superado por el método de análogos modernos y las redes neuronales, también es cierto que las SSTs no son la única variable ecológica que determina la distribución de los protistas planctónicos (e.g. **Zaric et al.**, 2005). Este es el caso, por ejemplo, de la distribución de las asociaciones de foraminíferos planctónicos en la Cuenca de Colombia en el Mar Caribe durante el Cuaternario tardío que habría resultado no solamente de las condiciones de la temperatura superficial sino también de los nutrientes aportados por el sistema de surgencia de la Guajira y de las descargas del río Magdalena (**Martínez et al.**, 2007). Si a esto se suma los efectos del nivel del mar, 120 m más bajo durante el LGM que ahora, entonces la reconstrucción de la posición media de la ITCZ a partir de los registros paleoceanográficos del Caribe debe ser tomada con precaución.

Un enfoque complementario al de la reconstrucción de las SSTs es el de la reconstrucción de la estructura de

la columna de agua, y la productividad primaria, con base en la relación entre la abundancia de *Florisphaera profunda* / otros coccolitofóridos a lo largo del Pacífico ecuatorial. Tal reconstrucción sugiere que durante el LGM habría existido una condición más afín a La Niña (**Beaufort et al.**, 2001). Interpretación análoga a la sugerida con base en la reconstrucción de las SSTs, por la técnica de análogos modernos (MAT) en foraminíferos planctónicos, a lo largo de un transecto norte-sur en la Cuenca de Panamá (EEP; **Martínez et al.**, 2003). Este último estudio demostró que las SSTs al sur del frente ecuatorial (el contacto entre la lengua fría al sur y las aguas cálidas de la Cuenca de Panamá) habrían descendido entre 3 y 5°C, mientras que en la cuenca se habrían mantenido constantes durante el último glacial. Este escenario es típico de la fase de La Niña y sería el responsable de la intensificación del Chorro del Chocó y, eventualmente del aumento de la precipitación en el litoral pacífico colombiano (cf. **Poveda et al.**, 2006). El registro palinológico de los núcleos ODP-677B y TR-163-38 evidencia la constancia del bosque del Chocó biogeográfico, y de aquí la acción continua del Chorro del Chocó durante los últimos 40 ka (**González et al.**, 2006). Este parece un escenario contrario al de El Niño cuando el Chorro del Chocó se debilita y se reduce la precipitación en el continente (e.g. **Poveda & Mesa** 2000; **Poveda** 2001). El estudio geoquímico del núcleo 106KL, colectado al oeste de Lima, parece apoyar la interpretación del escenario tipo – La Niña, ya que evidencias de actividad intensa del fenómeno de El Niño solo aparecen después de 17 ka, es decir 2 a 3 ka después del LGM (**Rein et al.**, 2005). Resultados similares se obtuvieron mediante el análisis de $\delta^{18}\text{O}$ en el foraminífero planctónico *Neoglobobulimina dutertrei* en el domo de Costa Rica (EEP) para los últimos 50 ka sugiriendo que la actividad del fenómeno del ENSO fue baja durante el LGM (**Leduc et al.**, 2009).

En contraste, un escenario tipo – El Niño durante el LGM ha sido interpretado con base en la relación Mg/Ca y los registros isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$) en foraminíferos planctónicos en los núcleos V21-30 y MD2181 colectados en el EEP (al este de las Islas Galápagos, **Koutavas et al.**, 2002) y el WEP (**Stott et al.**, 2002), respectivamente. La reconstrucción de la salinidad superficial en el WEP, con base en las diferencias isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$) en foraminíferos planctónicos, sugiere un incremento en la relación P-E (**Martínez et al.**, 1997) y con esto el desplazamiento aparente de la piscina caliente hacia el Océano Pacífico central (**Stott et al.**, 2002). Dos reconstrucciones parecen apoyar la hipótesis del escenario tipo – El Niño: (1) el estudio de la relación deuterio/hidrógeno (D/H) en alkenonas al oeste del río San Juan que sugiere una re-

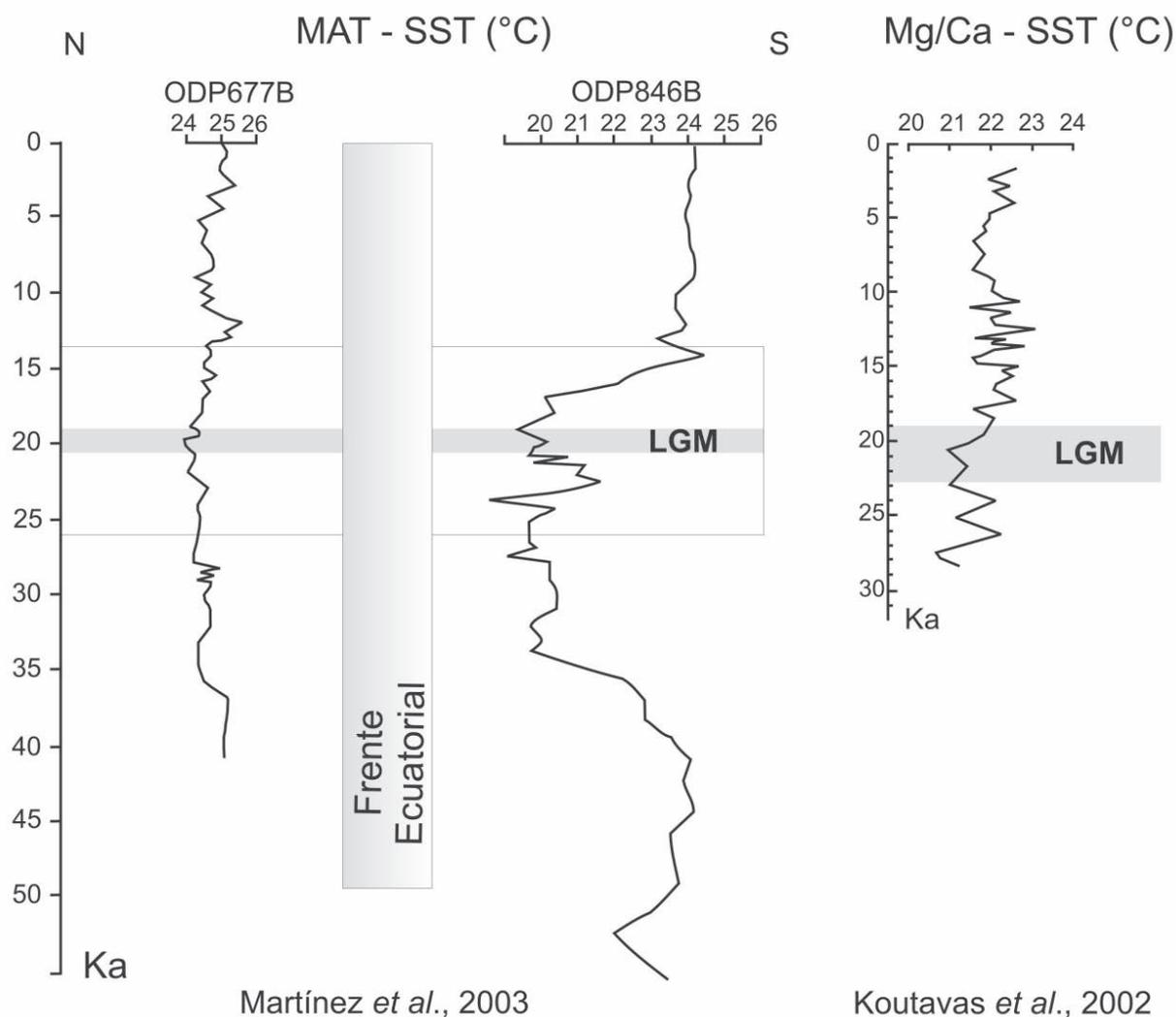


Figura 3. Reconstrucción de la temperatura superficial del océano (SST) en el Océano Pacífico Oriental (EEP) para los últimos 55 ka en los núcleos, ODP667B y ODP846B colectados al norte y sur del frente ecuatorial, respectivamente (Martínez *et al.*, 2003), y el núcleo V21-30 colectado al este de las Islas Galápagos (Koutavas *et al.*, 2002).

ducción en la precipitación para el litoral Pacífico colombiano durante el último glacial (Pahnke *et al.*, 2007) y (2) la reconstrucción del balance hidrológico del río Magdalena en el Cuaternario, con base en el análisis elemental de K/Ti, Fe/Ti, y Fe/Al en el núcleo ODP-999A (Cuenca de Colombia, Mar Caribe) que sugiere que la posición media de la ITCZ habría alcanzado un posición mas austral durante los periodos glaciales (Mora & Martínez 2005).

4.3.2. Evidencias continentales

En la síntesis de Markgraf & Díaz (2000) resulta aparente que en Java, Papua Nueva Guinea y el norte de Aus-

tralia, con base en análisis palinológicos, habrían existido condiciones frías y secas durante el LGM. Estudios recientes, sin embargo, muestran que el contenido porcentual de carbón vegetal (*charcoal*) en registros continentales de Papua Nueva Guinea es bajo, patrón que es interpretado como una condición fría (<5°C) y húmeda (Haberle *et al.*, 2001; Gagan *et al.*, 2004) y que por tanto sería mas afín a una escenario tipo – La Niña.

En contraste, los campos de dunas de los Llanos Orientales han sido considerados como una evidencia de condiciones áridas durante el LGM (e.g. Khobzi 1981). Su formación a partir de las sabanas aparentemente requeriría de un descenso de tan sólo 500 mm en la precipita-

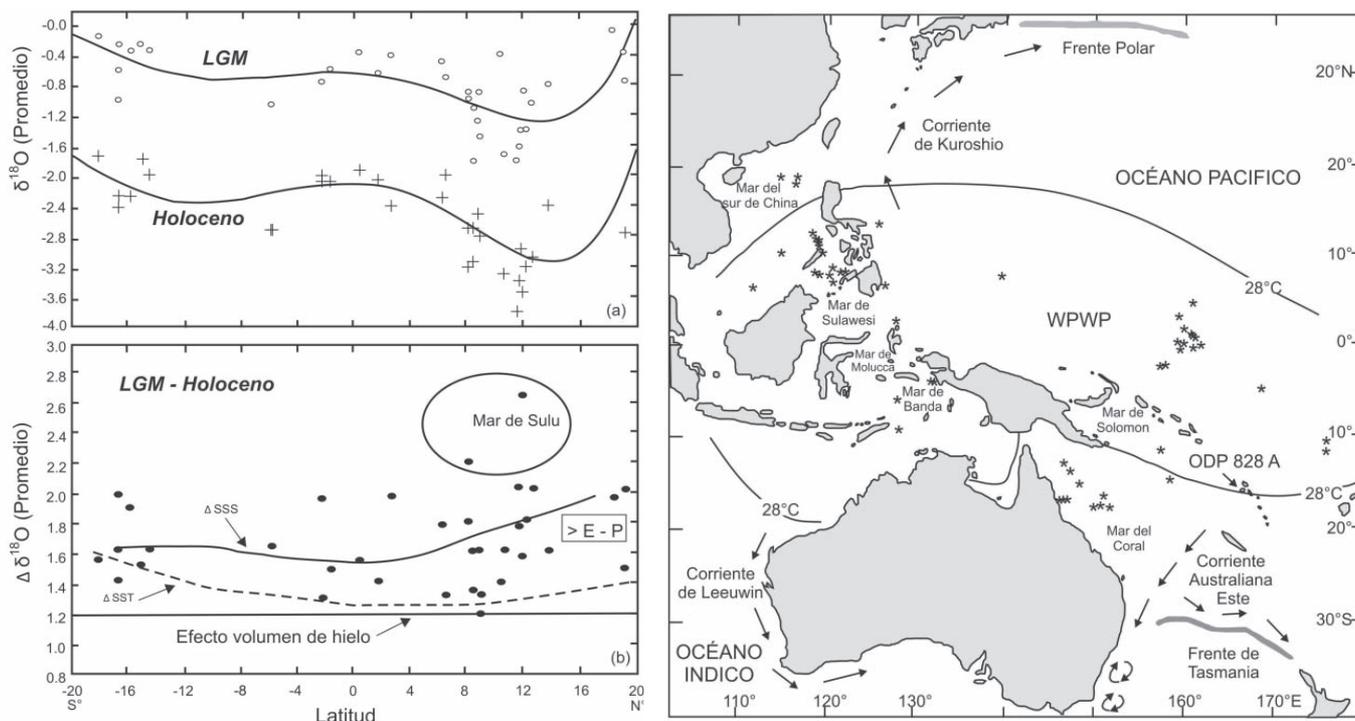


Figura 4. Reconstrucción de la salinidad (SSS) en la piscina caliente durante el último máximo glacial (LGM). El mapa muestra la isoterma de los 28°C que delimita la piscina caliente y los puntos de muestreo analizados. (a) transecto norte-sur de $\delta^{18}O$ promedio para el LGM y el Holoceno. (b) diferencia ($\Delta\delta^{18}O$) entre el LGM y el Holoceno. La diferencia entre la curva $\Delta\delta^{18}O$ con el efecto y la reconstrucción de la temperatura superficial (DSST) es usada como indicativa del exceso de salinidad durante el LGM. Para detalles vease a **Martínez et al.**, (1997).

ción, mientras que para la Cordillera Oriental el estimativo es del orden de 100 a 600 mm lo que significaría una reducción del 40-50% (**van der Hammen & Hooghiemstra** 2000). Estas estimaciones tienen un alto grado de incertidumbre, mas aun cuando se basan en el presupuesto que la evaporación en el pasado habría sido comparable a la del presente. En este caso, tal vez sería mejor hacer inferencias sobre la relación P-E y recurrir a indicadores tales como isótopos de oxígeno en moluscos (e.g. **Dettman et al.**, 1999; **Kaandorp et al.**, 2003).

Similarmente, la disminución aparente de los niveles de los lagos de la Amazonía para el LGM (e.g. **Ledru et al.**, 1998) favorecería la interpretación de un clima árido. La dinámica de la sedimentación en la región, sin embargo, favorece la pronta colmatación de los cuerpos de agua. Adicionalmente, si bien es cierto que habría existido un establecimiento diferencial de la vegetación sobre los varios niveles de terrazas fluviales (**van der Hammen & Hooghiemstra** 2000), también es cierto que estas no solo se forman como respuesta a condiciones climáticas sino también a condiciones tectónicas y cambios relativos del nivel del mar. A pesar de que aun no es posible determinar

con precisión la historia de levantamiento de la Cordillera Oriental a escalas milenales, si existen evidencias de actividad tectónica continua (e.g. **Mora et al.**, 2008). Por otra parte la curva de cambios relativos del nivel del mar muestra que para el LGM el descenso habría sido de ~120 m (e.g. **Lambeck & Chappell** 2001). Dicho descenso cambiaría el nivel de base del sistema fluvial del Amazonas y con esto la dinámica de sus afluentes haciéndolos mas erosivos. Esto explicaría la incisión de las terrazas bajas grueso-granulares del Pleniglacial y la ausencia de registros sedimentarios en muchos paleolagos y terrazas fino-granulares del LGM. Finalmente, evidencias palinológicas en el abanico del Amazonas sugieren que la extensión de la sabana durante el LGM habría sido reducida (e.g. **Hoorn** 1997; **Haberle** 1997).

La temperatura en las sabanas tropicales habría descendido 4°C de acuerdo con estimativos basados en el descenso de los cinturones de vegetación y con un gradiente de temperatura altitudinal (*lapse rate*) similar al presente, i.e. 0.7°C/100m para el LGM y 0.6°C/100m para el presente (e.g. **van der Hammen & Hooghiemstra** 2000). Este estimativo es cercano al establecido para el

Brasil (5°C) con base en el análisis de gases nobles en aguas subterráneas (**Stute et al.**, 1995). Estos resultados están de acuerdo con la reconstrucción de las SSTs del EEP favoreciendo así la hipótesis de una condición tipo – La Niña para el LGM (**Martínez et al.**, 2003). El descenso de los glaciares de montaña aparentemente apoya la hipótesis de un descenso pronunciado en la temperatura de las sabanas tropicales (e.g. **Thouret et al.**, 1997; **Lachniet & Vazquez-Selem** 2002).

Si bien es cierto que bajo un escenario marino tipo – La Niña debería esperarse una mayor precipitación en la piscina caliente y condiciones más áridas solo para algunas regiones de Suramérica durante el LGM, las evidencias continentales (e.g. **Haberle** 1998) no están de acuerdo con tal escenario, como tampoco algunas paleoceanográficas (e.g. **Martínez et al.**, 1997), lo que demuestra que las actuales teleconexiones del fenómeno del ENSO no son las mismas que para el LGM. La explicación posible es que con un descenso de la SST de 3°-4°C en la piscina caliente, el acople entre SST y convección atmosférica habría sido menor, resultando así en una precipitación reducida (**Markgraf & Díaz** 2000). En otras palabras, se habría reducido la capacidad de la atmósfera para contener vapor de agua (e.g. **Andrews** 2000).

4.3.3. Modelos de circulación global del océano y la atmósfera

La aparente controversia entre las reconstrucciones que sugieren escenarios tipo – La Niña o La Niña tendría su explicación en: (1) las incertidumbres que aun persisten con respecto a las teleconexiones del fenómeno del ENSO bajo condiciones frontera diferentes al presente (e.g. **Markgraf & Díaz** 2000), (2) el desconocimiento de la gama completa de mecanismos de retro-alimentación operantes bajo condiciones frontera diferentes a la actual, (3) la respuesta del fenómeno del ENSO durante eventos particulares que más semejan fenómenos multi-decadales como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, e.g. **Molnar & Cane** 2007), (4) la evaluación precisa de los indicadores paleoceanográficos bajo diferentes condiciones geológicas (**Mix** 2006), y (5) las incertidumbres propias de los diferentes modelos (e.g. **Rosenthal & Broccoli** 2004).

Varios modelos acoplados (GCMs) han sido propuestos para explicar el clima del LGM. Unos a favor del escenario tipo – La Niña (e.g. **Hewitt et al.**, 2003; **Kim et al.**, 2003) y otros a favor del escenario tipo – El Niño (e.g. **Shin et al.**, 2003; **Otto-Bliesner et al.**, 2003). El modelo de **Hewitt et al.** (2003) predice un enfriamiento de 3.3 a 6.5°C para los trópicos, mientras que el modelo de **Kim et al.** (2003) predice un aumento en la relación P–E para la

piscina caliente. Ambos modelos, favorecerían la reconstrucción de una condición tipo – La Niña para el EEP (cf. **Martínez et al.**, 2003). Sin embargo llama la atención el mapa global de la relación P–E de **Kim et al.**, (2003) y el patrón de teleconexiones que son diferentes al presente. Esto evidencia el carácter único del globo bajo una condición glacial extrema. En contraste, el modelo de **Shin et al.** (2003) predice SSTs comparables a las obtenidas durante el proyecto **CLIMAP** (1978), mientras que el modelo de **Otto-Bliesner et al.** (2003) predice el debilitamiento del gradiente zonal, el estrés del viento y la surgencia en el Océano Pacífico, al tiempo que predice eventos de El Niño/La Niña más intensos.

Adicionalmente el proyecto **MARGO** (2009), que compiló y revisó 696 registros paleoceanográficos de SST, demostró que posiblemente existieron variaciones estacionales y un gradiente zonal, y temperaturas bajas en la corrientes orientales de los océanos que serían más afines a una condición tipo – La Niña. Adicionalmente cuestionan el valor de simulaciones que son incapaces de capturar el gradiente zonal, e.g. el modelo paleoclimático Pmip (<http://pmip2.lsce.ipsl.fr>). **Otto-Bliesner et al.** (2009) comparan simulaciones del modelo Pmip con los resultados del proyecto **MARGO** (2009) y argumentan que no existen diferencias significativas en las SSTs de los mares tropicales y que la estacionalidad estaría pobremente expresada, a pesar que las simulaciones fallan en reproducir las SSTs en algunos sectores, i.e. en los sistemas de surgencia. De interés es el modelo de precipitación, obtenido a partir de la diferencia entre el LGM y una simulación de control, que muestra que en la WEP, ésta habría sido menor entre 2 y 6 mm/día (cf. **Martínez et al.**, 1997) comparado con el norte de Suramérica donde habría sido análoga al presente (**Clement et al.**, 2004).

De nuevo, solo mediante el estudio de registros sedimentarios de alta resolución será posible distinguir entre el modo climático y la variabilidad del fenómeno del ENSO en el LGM. Adicionalmente, es la integración multidisciplinaria la que permitirá reconstruir con precisión el modo paleoclimático y la variabilidad del fenómeno del ENSO operante durante el LGM (e.g. **Rosenthal & Broccoli** 2004; **Mix** 2006). En principio las simulaciones computacionales deben satisfacer las reconstrucciones paleoclimáticas basadas en indicadores geológicos para el LGM si se quiere que éstas sean capaces de predecir el clima futuro.

5. El fenómeno del ENSO durante el Holoceno

Es para el Holoceno cuando las condiciones frontera y mecanismos de retro-alimentación del sistema océano-at-

mósfera-criósfera son mejor entendidos. Por tanto, deberían esperarse reconstrucciones del fenómeno ENSO mas precisas. En la ausencia de registros de alta resolución tales como sedimentos laminados, corales y estalagmitas, este no es el caso. Regiones oceánicas sensibles como la piscina caliente, las corrientes de California y Perú, la lengua fría y las teleconexiones del fenómeno en el continente como el norte de Suramérica y Australia son de particular interés.

5.1. Evidencias paleoceanográficas

A partir de los registros de corales es posible reconstruir las SSTs y la relación P-E, y con esto la variabilidad anual, para el WEP y EEP durante tajadas discretas de tiempo (e.g. **Corrège et al.**, 2000; **Gagan et al.**, 2004; **Cobb et al.**, 2003). Adicionalmente, el estudio de Mg/Ca y $\delta^{18}\text{O}$ en foraminíferos extraídos de núcleos de aguas profundas de la piscina caliente, han permitido la reconstrucción de SSTs y SSSs para el Holoceno, i.e. incremento de $\sim 0.5^\circ\text{C}$ y ~ 1.5 psu durante los últimos 10 ka (**Stott et al.**, 2004), lo que sugeriría el paso de condiciones mas afines a El Niño (La Niña) durante el Holoceno temprano (tardío) o corroboraría la hipótesis de una posición mas austral de la ITCZ durante el Holoceno temprano (**Schmittner et al.**, 2000). Igualmente es de interés es el coral de Palmyra (Pacífico central), cuyo registro isotópico ($\delta^{18}\text{O}$) para el último milenio muestra la tendencia al aumento de la SST siguiendo el patrón en forma de “palo de cricket” característico de los tiempos históricos (**Cobb et al.**, 2003).

En contraste la reconstrucciones de las SSTs alrededor de las Islas Galápagos y la Dorsal de Carnegie y la piscina caliente, con base en el método de Mg/Ca en foraminíferos planctónicos sugieren que durante el Holoceno medio habrían existido condiciones tipo – La Niña, i.e. que el gradiente zonal de SSTs habría sido mayor entre 11 y 4 ka (**Koutavas et al.**, 2002, 2006), o que los eventos de El Niño, como se evidencia en el núcleo 106KL colectado al oeste de Lima, habrían sido mas débiles entre 9 y 4.2 ka (**Rein et al.**, 2005). Esta interpretación es apoyada por el estudio de $\delta^{15}\text{N}$ en Mindanao (Indonesia) donde la nutriclina/termoclina aparentemente era mas profunda después de 7 ka (**Kienast et al.**, 2008). Estas reconstrucciones definen eventos tipo – ENSO, o un estado climático, más que el dominio de una u otra fase en particular. Por tanto estarían más relacionados con los regímenes mileniales sugeridos por **Sun** (2000).

De la reconstrucción de las SSTs en el EEP por el método MAT en foraminíferos planctónicos es aparente que durante el Holoceno habría existido una condición mas

afín con El Niño (**Martínez et al.**, 2003). Sin embargo, la reconstrucción de la estacionalidad muestra valores altos durante el LGM y el Holoceno medio en comparación con la deglaciación y el Holoceno temprano en la Cuenca de Panamá. Patrón que posiblemente refleja la ocurrencia de un numero mayor de eventos cálidos e intensos en los primeros intervalos de tiempo (cf. **Otto-Bliesner et al.**, 2003). A pesar del interés de estas reconstrucciones, las señales muestran diferencias debidas a incertidumbres en los modelos de edad, resolución estratigráfica y respuesta de la biota al cambio climático. Es así como la evaluación de los patrones de variación porcentual de foraminíferos planctónicos y bentónicos, y cocolitofóridos, para los mismos núcleos, evidencia la ausencia de un cambio monotónico en respuesta al cambio climático durante la deglaciación (**Martínez et al.**, 2006). La explicación yace no sólo en la variaciones en la posición de la ITCZ y la influencia de los sistemas de surgencia de Panamá y la Lengua Fría, que actúan como una balanza bipolar a lo largo del año, sino que también en el aporte de nutrientes por parte de los ríos que drenan el litoral Pacífico (**Gómez & Martínez** 2005).

Reconstrucciones de la relación P–E y la SSTs en la Cuenca de Cariaco (Venezuela), con base en el contenido porcentual de Ti que es utilizado como indicador de la precipitación, sugieren que la ITCZ habría migrado hacia el sur durante el Holoceno tardío (**Haug et al.**, 2001b; **Tedesco & Thunell** 2003), y en general durante los periodos fríos incluyendo el evento Younger Dryas (12.5-11.7 ka), y la Pequeña Edad de Hielo (1300-1850 DC; **Peterson & Haug** 2006). A partir de los 4ka la intensidad y variabilidad del fenómeno del ENSO habría aumentado (**Haug et al.**, 2001b).

En apoyo de la hipótesis de la migración al sur de la ITCZ, **Gómez** (2004) y **Martínez et al.** (2010) documentan la formación de las terrazas bajas marinas de Manzanillo del Mar (Bolívar) a partir de una espiga de dirección suroeste en momentos que los vientos Alisios se hacían mas intensos, i.e. a partir de ~ 3 ka. **Martin et al.** (1993) con base en un estudio análogo para la costa del Brasil, la reconstrucción de los niveles del lago Titicaca, y evidencias fluviales y palinológicas en la Amazonia sugieren la existencia de condiciones tipo – El Niño antes de 3900 ka AP, su ausencia entre 3900-3600 y 2800-2500 ka AP y su baja frecuencia después de 2500 ka AP.

La dificultad de la correlación entre los resultados de **Martin et al.**, (1993), y los resultados de **Haug et al.**, (2001) y **Koutavas et al.**, (2006) refleja la multiplicidad de indicadores empleados, resolución estratigráfica y variabilidad paleoclimática regional.

5.2. Evidencias continentales

Para el norte de Suramérica en la transición del LGM al Holoceno durante el evento Younger Dryas tanto evidencias continentales como paleoceanográficas, sugieren condiciones frías y secas afines a un escenario tipo – El Niño (e.g. **van der Hammen & Hooghiemstra** 1995; **Rincón & Martínez** 2004).

Este no es el caso del Holoceno temprano cuando las evidencias paleoclimáticas continentales muestran que habrían existido, entre otras, condiciones más húmedas para el oeste de los Estados Unidos y el norte de Chile, y condiciones más secas para el este de Australia – oeste de Nueva Zelanda, este del África y la India. Patrón que no puede ser atribuido a un escenario tipo – El Niño, sino que habría estado relacionado más con rasgos característicos del patrón de vientos, en el que se destaca la reducción de los monzones, los cuales están íntimamente ligados al fenómeno del ENSO (**Markgraf & Díaz** (2000).

De interés es el registro de isótopos ($\delta^{18}\text{O}$) de la estalagmita Chilibrillo (Panamá) para los últimos dos milenios que es empleado para reconstruir la posición de la ITCZ (**Lachniet et al.**, 2004). Posiciones más australes de la ITCZ, i.e. condiciones secas, aparentemente corresponderían con eventos y la desaparición de la cultura Maya. Similarmente, evidencias arqueológicas en la costa del Perú sugieren que el fenómeno del ENSO se habría iniciado hace 5 ka (**Sandweiss et al.**, 1996) y aún más tempranamente a partir de evidencias paleolimnológicas del lago-crater Brainbridge (Islas Galápagos) que sugieren que este se inició hace ~6.1 ka (**Riedinger et al.**, 2002). **Conroy et al.** (2008), con base en el estudio granulométrico del lago Junco (Islas Galápagos), sugieren que antes de 9 y después de 4.2 ka habrían existido condiciones tipo – El Niño, con lo que estarían de acuerdo parcialmente con los resultados paleoceanográficos de **Koutavas et al.** (2006), en lo que respecta a la reducción del fenómeno del ENSO durante el Holoceno temprano a medio. También esta de acuerdo con la hipótesis de la migración austral de la ITCZ durante el Holoceno tardío (**Haug et al.**, 2001).

Registros de las variaciones del fenómeno del ENSO (y la ITCZ) en el Holoceno en Colombia incluyen estudios palinológicos y micropaleontológicos en: (1) la depresión Momposina (e.g. **van der Hammen** 1984; **van der Hammen & Cleff** 1992), (2) el páramo de Frontino (e.g. **Velásquez** 2005) y, (3) algunos registros regionales (e.g. **Marchant & Hooghiemstra** 2004; **Vélez et al.**, 2006). Admitiendo incertidumbres en las correlaciones basadas en dataciones radiocarbono, condiciones húmedas se habrían presentado en la depresión Momposina a partir de 2.5 ka

(**van der Hammen** 1984), lo que parece contrario al patrón de la Cuenca de Cariaco (**Haug et al.**, 2001), excepto para el intervalo entre 3 y 2 ka. En el caso del páramo de Frontino, algunos intervalos secos parecen corresponder con los registrados en el Caribe, e.g. 3.2 a 2.7 ka. El porcentaje de elementos de páramo en la Laguna de Fuquene (**van der Hammen & Hooghiemstra** 1995) aparentemente es análogo al registro de Ti (%) en la Cuenca de Cariaco lo que apoyaría la reconstrucción de la migración latitudinal de la ITCZ durante el Holoceno (**Peterson & Haug** 2006).

La baja resolución estratigráfica y/o bioturbación de estos registros impide resolver eventos anuales por lo que posiblemente se están registrando eventos multidecadales a mileniales. En el caso de la depresión Momposina, los cambios del nivel de base locales del sistema fluvial del Magdalena deben ser considerados porque constituyen controles tanto autocíclicos (dinámica de la sedimentación), como alocíclicos (movimientos tectónicos; **Martínez & López** 2005). Si bien es cierto que no son independientes del clima regional, sus productos, i.e. registros sedimentarios y palinológicos, pueden responder en forma no lineal al cambio climático.

Las reconstrucciones de biomas basadas en estudios palinológicos de 41 sitios concentrados en la región andina y los llanos, para tajadas discretas de tiempos (cada 3 ka; **Marchant et al.**, 2002), sugieren que condiciones frías y secas se extendieron desde el LGM hasta 12 ka. Condiciones que se hicieron más frías hace 9 ka para luego cambiar a condiciones más cálidas hace 6 ka; condición que se hizo de nuevo más húmeda hace 3 ka.

Sin embargo, sólo para el Holoceno tardío se tienen evidencias contundentes de la frecuencia y magnitud del fenómeno del ENSO en el neotrópico. El registro laminado de la laguna Pallcacocha en los Andes ecuatorianos contiene la historia detallada (anual) de los últimos 15ka (**Rodbell et al.**, 1999; **Moy et al.**, 2002). Allí es evidente que el fenómeno del ENSO en su frecuencia actual solo aparece después de ~6 ka. De interés es el registro de la fragmentación de los foraminíferos planctónicos en el núcleo Kama-13 colectado en el margen continental de Nariño, cuyo patrón porcentual es análogo al número de eventos ENSO/100 años en la Laguna Pallcacocha y que se explicaría por la migración hacia el este de la piscina caliente y con esto una mayor abundancia de foraminíferos susceptibles a la disolución en el fondo marino (**Marin & Bayona** 2007; **Martínez et al.**, 2009a). Igualmente interesante es la correspondencia entre el inicio del fenómeno ENSO y la domesticación del maíz (*Zea mays*) en Mesoamérica (**Pope et al.**, 2001). Resultados análogos a los de la Laguna Pallcacocha fueron hallados en el registro de isótopos de

nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) en la cuenca marina de Halmahera (Indonesia, WEP) para los últimos 3.5 ka (Langton *et al.*, 1988). Se destacan en este registro el incremento de la actividad de El Niño hace 1.7 ka, seguido de picos a 1.5, 1.15, y ca.0.7 ka, con una disminución marcada para el Periodo Cálido Medieval (Langton *et al.*, 1988).

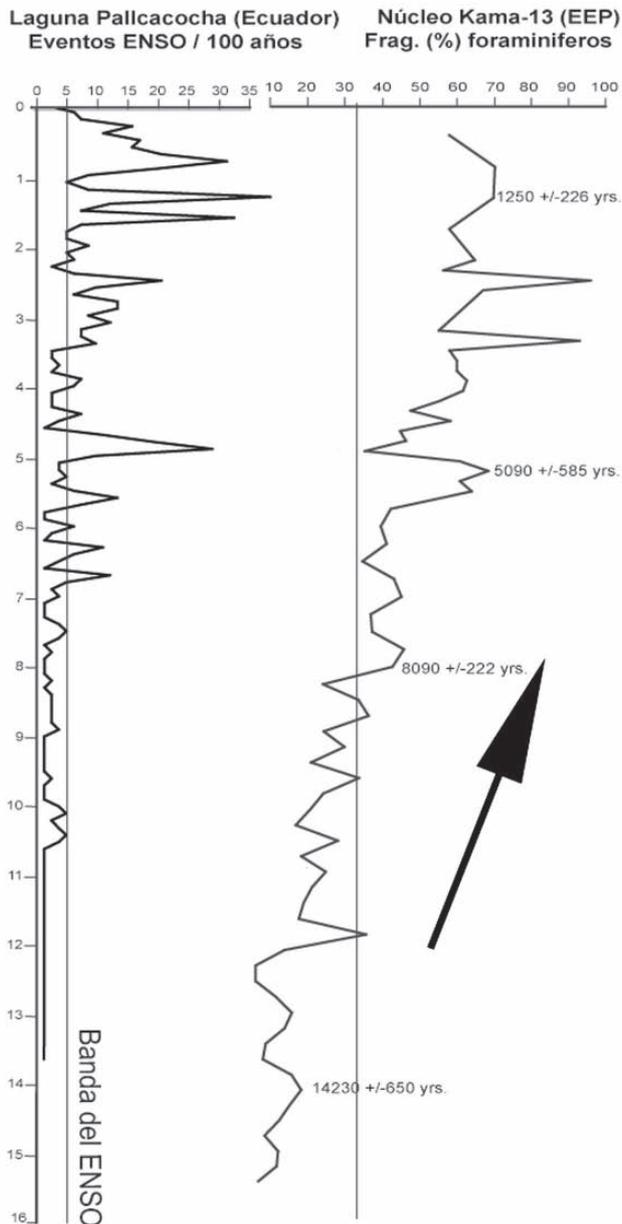


Figura 5. Comparación entre el registro del número de eventos ENSO / 100 años de la Laguna Pallcacocha (Ecuador, Moy *et al.*, 2002) con el registro del porcentaje de fragmentación de foraminíferos planctónicos recuperados del núcleo Kama-13 del margen continental de la Cuenca de Panamá (Marín & Bayona 2007; Martínez *et al.*, en prep.). Los valores al lado de la curva indican edades radiocarbono. Note la tendencia de las dos curvas y la correlación pico a pico.

Con respecto a los registros continentales en Colombia, existe un gran potencial en la sucesión de sedimentos lacustre – fluviales laminados de Santa Fe de Antioquia (Page & Mattson 1981; Ruiz *et al.*, 2005). Trabajo en progreso parece confirmar la hipótesis del represamiento del río Cauca durante el Holoceno tardío (cf. Page & Mattson 1981) y ha demostrado que la sucesión se depositó entre 6 y 1.5 ka con velocidades de sedimentación del orden de 120cm/ka (Martínez *et al.*, 2009b).

Para el periodo cálido Medieval (900-1300 DC), aparentemente se presentó una anomalía importante del fenómeno del ENSO, como es evidenciado a partir de un núcleo colectado sobre la plataforma al oeste de Lima (Rein *et al.*, 2004).

5.3. Modelos

Varios modelos han explorado el rol de las variaciones orbitales sobre las regiones tropicales y demostrado la importancia de la precesión (Clement *et al.*, 1999) y la radiación estacional (Clement *et al.*, 2000) en la recurrencia del fenómeno del ENSO. Modelos acoplados atmosfera – océano (e.g. Liu *et al.*, 2003; Otto-Bliesner *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2008) confirman la interpretación del fenómeno del ENSO reducido para el Holoceno medio (e.g. Rodbell *et al.*, 1999; Koutavas *et al.*, 2002, 2006).

En los modelos de circulación atmosférica Pmip y CPTEC para el Holoceno medio (Valdés 2000; Dias de Melo & Marengo 2008) es aparente una ligera disminución en la precipitación para el norte de Suramérica, no así su patrón el cual es análogo al presente corroborando así la interpretación de la permanencia del bosque del Chocó (e.g. González *et al.*, 2006). Llama la atención, sin embargo, la ausencia del Chorro del Chocó en el modelo CPTEC, así como el mayor flujo de humedad atmosférica entre el Mar Caribe y el Océano Pacífico a través de Centro América, i.e. Chorros de Panamá y Papagayo, como también la constancia de las temperaturas superficiales.

En todos los modelos son igualmente importantes tanto las condiciones frontera como la física de las ecuaciones. En el mejor de los casos las resoluciones geográficas obtenidas no son superiores a los $3^{\circ}\times 3^{\circ}$. Esto limita las comparaciones con los registros paleoclimáticos.

6. El fenómeno ENSO y los eventos orogénicos en el norte de Suramérica

La posible relación entre la formación de cadenas orogénicas y el clima ha sido motivo de intensas discusiones desde hace dos décadas (e.g. Molnar & England

1990; **Montgomery et al.**, 2001; **Lamb & Davis** 2003; **Molnar** 2004). La controversia surgió cuando se cuestionó la acción pasiva del levantamiento cordillerano, el cual habría servido de barrera a los vientos y con esto forzado su ascenso orográfico, condensación y formación de frentes y sombras de lluvia. La hipótesis alterna sugiere que el clima, i.e. precipitación, habría facilitado la erosión y denudación de orógenos incipientes, los cuales sufrirían exhumación intensa buscando la compensación isostática.

En Colombia, la historia del levantamiento de las Cordilleras Oriental y Central ha sido documentada mediante evidencias palinológicas (**van der Hammen et al.**, 1973) y análisis de trazas de fisión en apatitos y circones (e.g. **Mora et al.**, 2008; **Toro et al.**, 2008; **Restrepo-Moreno et al.**, 2009). Mas regionalmente mediante el estudio de la sedimentación clástica del abanico del Amazonas (e.g. **Harris & Mix** 2002).

Mora et al. (2008) descartan la posibilidad que exista una relación entre el clima regional y el levantamiento de la Cordillera Oriental. Su aseveración se basa en la aparente predicción que el noreste de Suramérica habría sido seco durante el Plioceno (**Molnar & Cane** 2002). Dos hechos son de señalar: (1) **Molnar & Cane** (2002) solo hacen referencia al Brasil, pero no al norte de Suramérica, (2) aceptando una condición permanente de El Niño, y teleconexiones análogas al presente, durante el Plioceno temprano ciertamente esperaríamos condiciones mas secas para el norte de Suramérica. Sin embargo, estas posiblemente no tendrían un afecto mayor sobre la incipiente Cordillera Oriental cuyo régimen climático estaría mas controlado por la sombra de lluvia generada por la Cordillera Central cuyo levantamiento ha sido documentado entre el Cretácico tardío y el Eoceno temprano (**Gómez et al.**, 2005). De otra forma, sin embargo, la Cordillera Central habría servido de barrera a los vientos Alisios del noreste y creado un frente orográfico capaz de mantener el bosque del piedemonte llanero y la sabana tropical (cf. **Poveda et al.**, 2006).

La comparación entre las curvas $\Delta\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos planctónicos entre los dos extremos del Océano Pacífico, usada como evidencia de cambio entre una condición permanente tipo – El Niño a una condición tipo – La Niña hace 4 Ma (**Chaisson & Ravelo** 2000) y el diagrama de paleo-elevación de la Cordillera Oriental (**Mora et al.**, 2008) sugieren una estrecha relación entre el clima y la formación del orógeno. Es decir un Chorro del Chocó mas intenso bajo la condición de La Niña, cuyos complejos convectivos de meso-escala habrían alcanzado a hacerse sentir sobre la ancestral Cordillera Oriental, como lo hacen hoy (e.g. **Mesa et al.**, 1997; **Poveda et al.**, 2006).

7. Conclusiones

Cuando se examinan las evidencias geológicas del fenómeno ENSO es clara la limitación impuesta por la resolución estratigráfica de los registros, sus modelos de edad, herramientas de reconstrucción empleadas y cobertura geográfica. Por su parte los modelos están limitados por las condiciones frontera, resolución y ecuaciones físicas empleadas. Todas las limitaciones controladas al máximo, aún parece que las reconstrucciones proveen generalmente una imagen del estado climático a escalas decadales a mileniales insuficientes para resolver el fenómeno del ENSO. Así aparece que:

- a. Durante el Eoceno temprano no parecen haber existido condiciones permanentes del fenómeno del ENSO. Aquí, condiciones frontera diferentes a las actuales limitarían la aplicación de los depósitos lacustres como registros de teleconexiones con el Océano Pacífico ecuatorial.
- b. Durante el Plioceno temprano habrían existido condiciones tipo – El Niño, sin embargo la física de esta condición aun no es clara.
- c. En la transición del Pleistoceno medio al tardío se habría pasado de una condición tipo – El Niño a una tipo – La Niña. Durante este último habrían dominado condiciones La Niña (El Niño) durante los estadales (interestadales).
- d. Durante el LGM el mayor número de evidencias geológicas (y modelos) sugieren una condición tipo – La Niña. Sin embargo las evidencias contradictorias muestran la complejidad de un escenario climático opuesto al actual.
- e. Durante el Holoceno es evidente el incremento en el número, e intensidad, de eventos del ENSO en el neotrópico a partir de 6 Ka, acompañado de la migración austral de la ITCZ.
- f. A través de todo el Cenozoico, el estado climático y la dinámica del Chorro del Chocó, junto con los vientos Alisios del noreste, habrían tenido una incidencia importante sobre la formación del orógeno andino, hipótesis que aun necesita ser puesta a prueba.
- g. En Colombia existe un inmenso potencial para adelantar estudios de alta resolución, correlaciones océano-continente y la respuesta de la biota al cambio climático. La región es clave para la comprensión de la variabilidad climática a diversas escalas de tiempo por que aquí se conjugan la influencia del fenómeno del

ENSO y el transporte inter-oceánico de humedad que controla los ciclos glaciales interglaciales, entre otros.

Bibliografía

- Andrews, D.** 2000. An Introduction to Atmospheric Physics. Cambridge Univ. Press. 229 p.
- Allan, R.J.** 2000. ENSO and climate variability in the past 150 years. In: H.F. Diaz, V. Markgraf (eds.) El Niño and the Southern Oscillation, Cambridge Univ. Press, 3-55.
- Allmon, W.D.** 1988. Ecology of Recent Turritelline gastropods (Prosobranchia, Turritellidae): Current knowledge and paleontological implications. *Palaios* 3(3), 259-284.
- Archer, D.** 2007. Global Warming, understanding the forecast. Blackwell Publ. 194 pp.
- Barker, S., Cacho, I., Benway, H., Tachikawa, K.** 2005. Planktonic foraminiferal Mg/Ca as a Proxy for past oceanic temperatures: a methodological overview and data compilation for the last glacial maximum. *Quat. Sc. Rev.* 24, 821-834.
- Barreiro, M., Philander, G., Pakanowski, R., Fedorov, A.** 2005. Simulations of warm tropical conditions with application to middle Pliocene atmospheres. *Clim. Dyn.* doi:10.1007/00382-005-0086-4.
- Battisti, D.S., Hirst, A.C.** 1989. Interannual variability in a tropical atmosphere ocean model-influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity. *J. Atmos. Sci.* 46, 1687-1712.
- Beaufort, L., de Garidel-Thoron, T., Mix, A.C., Pisias, N.G.** 2001. ENSO-like forcing on oceanic primary production during the late Pleistocene. *Nature* 293, 2441-2444.
- Beck, J.W., Edwards, R.L., Ito, E., Taylor, F.W., Recy, J.** 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium calcium ratios. *Science* 257, 644-47.
- Bendle, J., Roselle-Mele, A.** 2004. Distribution of U³⁷ and U³⁷ in the surface waters and sediments of the Nordic Seas: Implications for paleoceanography. *Geochem. Geophys. 5:Q11013*, doi: 11010, 11029/12224GC000741.
- Berner, R.A.** 2004. The Phanerozoic Carbon Cycle: CO₂ y O₂. Oxford Univ. Press. 150 p.
- Bianucci, G., Di Celma, C., Landini, W., Buckeridge, J.** 2006. Palaeoecology and taphonomy of an extraordinary whale barnacle accumulation from the Plio-Pleistocene of Ecuador. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 242, 326-342
- Bjerknes, J.** 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Montly Weather Rev.* 115, 51-74.
- Bradley, R.** 1999. Paleoclimatology. Academic Press, 613 p.
- Cane, M.A.** 1998. A role for the tropical Pacific. *Science* 282, 59-61.
- . 2005. The evolution of El Niño, past and future. *Earth Planet. Sc. Lett.* 230, 227-240.
- Cannariato, K.G., Ravelo, A.C.** 1997. Plio-Pleistocene evolution of eastern tropical Pacific rate of circulation and thermocline depth, *Paleoceanography* 12, 805-820.
- Chaisson, W.P., Ravelo, A.C.** 2000. Pliocene development of the east - west hydrographic gradient in the tropical Pacific. *Paleoceanography* 15, 497-505.
- Chiang, J.C.H.** 2009. The Tropics in Paleoclimate. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 37, 263-297.
- Clement, A.C., Seager, R., Cane, M.A., Zebiak, S.E.** 1996. An ocean dynamical thermostat. *J. Climate* 9, 2190-2196.
- , ———, ———. 1999. Orbital controls on El Niño/Southern Oscillation and the tropical climate. *Paleoceanography* 14, 441-456.
- , ———, ———. 2000. Suppression of El Niño during the mid-Holocene by changes in the Earth's orbit. *Paleoceanography* 15, 731-737.
- , **Hall, A., Broccoli, A.J.** 2004. The importance of precessional signals in the tropical climate. *Clim. Dyn.* 22, 327-41.
- CLIMAP.** 1978. The surface of the ice-age Earth. *Science* 191, 1131-1137.
- Cobb, K.M., Charles, C.D., Cheng, H., Edwards, R.L.** 2003. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature* 424, 271-276.
- Cohen, A.L., Owens, K.E., Layne, G.D., Shimizu, N.** 2002. The effect of algal symbionts on the accuracy of Sr/Ca paleotemperatures from Coral. *Science* 296, 331-333.
- Conroy, J.L., Overpeck, J.T., Cole, J.E., Sanan, T.M., Steinitz-Kannan, M.** 2008. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record. *Quat. Sc. Rev.* 27, 1166-1180.
- Corrège, T., Delcroix, T., Récy, J., Beck, W., Cabioch, G., Le Cornec, F.** 2000. Evidence for stronger El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events in a mid-Holocene massive coral. *Paleoceanography* 15(4), 465-470.
- Crowley, T.J., North, G.R.** 1991. Paleoclimatology. Oxford Univ. Press. 349 p.
- Cruz, F.W., Vuille, M., Burns, S., Wang, X., Cheng, H., Werner, M., Edwards, R.L., Karmann, I., Auler, A.S., Nguyen, H.** 2009. Orbitally driven east-west antiphasing of South American precipitation. *Nature Geoscience* doi:10.1038/NCEO444.
- de Garidel-Thoron, T., Rosenthal, Y., Bassinot, F., Beaufort, L.** 2005. Stable sea surface temperatures in the western Pacific warm pool over the past 1.75 million years. *Nature* 433, 294-298.
- Dias de Melo, M.L., Marengo, J.A.** 2008. The influence of changes in orbital parameters over South American climate using the CPTec AGCM: simulation of climate during the mid Holocene. *The Holocene* 18,4, 501-516.
- Dekens, P.S., Ravelo, A.C., McCarthy, M.D.** 2007. Warm upwelling regions in the Pliocene warm period. *Paleoceanography* 22, PA3211, doi:10.1029/2006PA001394.
- , ———, ———, ———. 2008. A 5 million year comparison of Mg/Ca and alkenone paleothermometers. *Geochem. Geophys. 9, Q10001*, doi:10.1029/2007GC001931.

- Dettman, D.L., Reische, A.K., Lohmann, K.C.** 1999. Controls on the stable isotope composition of seasonal growth bands in aragonitic fresh-water bivalves (unionoidae). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63 (7/8), 1049–1057.
- Draut, A.E., Raymo, M.E., McManus, J.F., Oppo, D.W.** 2003. Climate stability during the Pliocene warm period. *Paleoceanography* 18(4), 1078, doi: 10.1029/2003PA000889.
- Duque-Caro, H.** 1990. Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and evolution of the Panama Seaway. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 77, 203-234.
- Farrell, J.W., Raffi, I., Janecek, T.R., Murray, D.W., Levitan, M., Dadey, K.A., Emeis, K.C., Lyle, M., Flores, J.A., Hovan, S.** 1995. Late Neogene sedimentation patterns in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results* 138, 717 -756.
- Fedorov, A.V., Dekens, P.S., McCarthy, M., Ravelo, A.C., de Menocal, P.B., Barreiro, M., Pacanowski, R.C., Philander, S.G.** 2006. The Pliocene Paradox (Mechanisms for a Permanent El Niño). *Science* 312, 1485-1489.
- Flohn, H.** 1981. A hemispheric circulation asymmetry during late Tertiary. *Geol. Rundsch.* 70, 725-736.
- Gagan, M.A., Hendy, E.J., Haberle, S.G., Hantoro, W.S.** 2004. Post-glacial evolution of the Indo-Pacific warm pool and El Niño-Southern Oscillation. *Quat. Int.* 118-119, 127-143.
- Gómez, A.** 2004. Reconstrucción de cambios paleobatimétricos holocénicos de las terrazas marinas de la región de Cartagena (Bolívar): Un estudio basado en la malacofauna fósil. Tesis de Grado, Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad Eafit. 156 p.
- Gómez, M.C., Martínez, J.I.** 2005. Nueva productividad en el Océano Pacífico oriental ecuatorial como respuesta al aporte de nutrientes por el río San Juan, sistemas de surgencia costera y polvo atmosférico. *Boletín de Geología UIS.* 27(2), 99-114.
- Gómez, E., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Hegarty, K., Kelley, S.** 2005. Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes. *GSA Bulletin* 117 (5/6), 547-569.
- Gonzalez, C., Urrego, L.E., Martínez, J.I.** 2006. Late Quaternary vegetation and climate change in the Panama Basin: palynological evidence from marine cores ODP 677B and TR 163-38. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 234, 62-80.
- Guilderson, T.P., Fairbanks, R.G., Rubenstone, J.L.** 1994. Tropical temperature variations since 20,000 years ago: Modulating Interhemispheric Climate Change. *Science* 263, 663-665.
- Haberle, S.G.** 1997. Upper Quaternary vegetation and climate history of the Amazon Basin: correlating marine and terrestrial pollen records. In: R.D. Flood, D.J.W. Piper, A. Klaus, L.C. Peterson (eds.) *Proc. ODP, Sci. Results* 155, 381-396.
- 1998. Late Quaternary vegetation change in the Tari Basin, Papua New Guinea. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 137, 1-24.
- , **Hope, G.S., van der Kaars, S.** 2001. Biomasa burning in Indonesia and Papua New Guinea: natural and human induced fire events in the fossil record. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 171, 259-268.
- Harris, S.E., Mix, A.C.** 2002. Climate and tectonic influences on continental erosion of tropical South America, 0–13 Ma. *Geology* 30, 447-450.
- Haug, G.H., Tiedemann, R., Zahn, R., Ravelo, A.C.** 2001a. Role of Panama uplift on oceanic freshwater balance. *Geology* 29(3), 207-210.
- , **Hughen, K.A., Sigman, D.M., Peterson, L.C., Rohls, U.** 2001b. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science* 293, 1304-1308.
- Haywood, A.M., Valdes, P.J., Pec, V.L.** 2007. A permanent El Niño – like state during the Pliocene? *Paleoceanography* 22, PA1213, doi:10.1029/2006PA001323.
- Hewitt, C.D., Stouffer, R.J., Broccoli, A.J., Mitchell, J.F.B., Valdes, P.J.** 2003. The effect of ocean dynamics in a couple GCM simulation of the Last Glacial Maximum. *Clim. Dyn.* 20, 203-218.
- Hoerling, M.P., Kumar, A.** 2000. Understanding and predicting extratropical teleconnections related to ENSO. In: H.F. Diaz, V. Markgraf (eds.) *El Niño and the Southern Oscillation*, Cambridge Univ. Press, 57-88.
- Hoorn, C.** 1997. Palynology of the Pleistocene glacial/interglacial cycles of the Amazon Fan (Holes 940A, 944A, and 946A). In: R.D. Flood, D.J.W. Piper, A. Klaus, L.C. Peterson (eds.) *Proc. ODP, Sci. Results* 155, 397-410.
- , **Guerrero, G., Sarmiento, G.A.** 1995. Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology* 23(3), 237-240.
- Hovan, S.A.** 1995. Late Cenozoic atmospheric circulation intensity and climatic history recorded by eolian deposition in the eastern equatorial Pacific Ocean. *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results* 138, 615-625.
- Huber, M., Caballero, R.** 2003. Eocene El Niño: Evidence for robust tropical dynamics in the “Hothouse”. *Science* 299, 877-881.
- Hughen, K.A., Schrag, D.P., Jacobsen, S.B., Hantoro, W.** 1999. El Niño during the last interglacial period recorded by a fossil coral from Indonesia. *Geophys. Res. Lett.* 20, 3129-3132.
- Ibaraki, M.** 1997. Closing of the Central American Seaway and Neogene coastal upwelling along the Pacific coast of South America. *Tectonophysics* 281, 99-104.
- Jaramillo, C., Rueda, M., Mora, G.** 2006. Cenozoic Plant Diversity in the Neotropics. *Science* 311, 1893-1896.
- Kaandorp, R.J.G., Vonhof, H.B., Del Busto, C., Wesselingh, F.P., Ganssen, G.M., Marmol, A.E., Romero Pittman, L., Van Hinte, J.E.** 2003. Seasonal stable isotope variation of the Amazonian fresh water bivalve *Anodontites trapesialis*. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 194 (4), 339– 354.
- Keigwin, L.D.** 1982. Isotope paleoceanography of the Caribbean and east Pacific: role of Panama uplift in late Neogene time. *Science* 217, 350-352.

- Kienast, M., Lehmann, M.F., Timmermann, A., Galbraith, E., Bolliet, T., Holbourn, A., Normandeau, C., Laj, C.** 2008. A mid-Holocene transition in the nitrogen dynamics of the western equatorial Pacific: Evidence of a deepening thermocline? *Geoph. Res. Lett.* 35, L23610, doi: 10.1029/2008GL035464.
- Khobzi, J.** 1981. Los campos de dunas de Colombia y de los Llanos Orientales de la Orinoquia (Colombia y Venezuela). *Revista CIAF* 6(1-3), 257-292.
- Kim, S.-J., Flato, G.M., Boer, G.J.** 2003. A couple climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 2: approach to equilibrium. *Clim. Dyn.* 20, 635-661.
- Koutavas, A., Lynch-Stieglitz, J., Marchitto, T.M., Sachs, J.P.** 2002. El Niño-like pattern in ice age tropical sea surface temperature. *Science* 297, 226-230.
- , **deMenocal, P.B., Olive, G.C., Lynch-Stieglitz, J.** 2006. Mid-Holocene El Niño–Southern Oscillation (ENSO) attenuation revealed by individual foraminifera in eastern tropical Pacific sediments. *Geology* 34(12), 993-996.
- Kucera, M., Rosell-Mele, A., Schneider, R.R., Waelbroeck, C., Weinelt, M.** 2005. Multiproxy approach to the reconstruction of the glacial ocean surface (MARGO). *Quat. Sc. Rev.* 24, 813-819.
- Lachniet, M.S., Burns, S.J., Piperno, D.R., Asmerom, Y., Polyak, V.J., Moy, C.M., Christenson, K.** 2004. A 1500-year El Niño/Southern Oscillation and rainfall history for the Isthmus of Panama from speleothem calcite. *J. Geophys. Res.* 109, D20117, doi:10.1029/2004JD004694.
- , **Vazquez-Selem, L.** 2005. Last Glacial Maximum equilibrium line altitudes in the circum-Caribbean (Mexico, Guatemala, Costa Rica, Colombia, and Venezuela). *Quat. Internat.* 138–139, 129-144.
- Lamb, S., Davis, P.** 2003. Cenozoic climate change as a possible cause for the rise of the Andes. *Nature* 425, 792-797.
- Lambeck, K., Chappell, J.** 2001. Sea level change through the last glacial cycle. *Science* 292, 680-686.
- Langton, S.J., Linsley, B.K., Robinson, R.S., Rosenthal, Y., Oppo, D.W., Eglinton, T.I., Howe, S.S., Djajadihardja, Y.S., Syamsudin, F.** 1988. 3500 yr record of centennial-scale climate variability from the Western Pacific Warm Pool. *Geology* 36(10), 795-798.
- Lawrence, K.T., Liu, Z., Herbert, T.D.** 2006. Evolution of the Eastern Tropical Pacific through Plio-Pleistocene Glaciation. *Science* 312, 79-83.
- Ledru, M.-P., Bertaux, J., Sifeddine, A., Suguio, K.** 1998. Absence of last glacial maximum records in lowland tropical forests. *Quaternary Res.* 49, 233-237.
- Leduc, G., Vidal, L., Cartapanis, O., Bard, E.** 2009. Modes of eastern equatorial Pacific thermocline variability: Implications for ENSO dynamics over the last glacial period. *Paleoceanography* 24, doi: 10.1029/2008PA001701.
- Liu, Z., Kutzbach, J., Wu, L.** 2000. Modeling climate shift of El Niño variability in the Holocene. *Geoph. Res. Lett.* 27(15), 22652268.
- MARGO Project Members.** 2009. Constraints on the magnitude and patterns of ocean cooling at the Last Glacial Maximum. *Nature Geoscience* 2, 129-132.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C.** 1997. A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon. *Bull. Amer. Meteorol. Society* 78, 1069-1079.
- Marchant, R., Behling, H., Berrío, J.C., Cleef, A., Duivenvoorden, J., Hooghiemstra, H., Kuhry, P., Melief, B., Schreve-Brinkman, E., Van Geel, B., Van der Hammen, T., Van Reenen, G., Wille, M.** 2002. Pollen-based biome reconstructions for Colombia at 3000, 6000, 9000, 12 000, 15 000 and 18 000¹⁴C yr ago: Late Quaternary tropical vegetation dynamics. *J. Quat. Sc.* 17(2), 113-129.
- , **Hooghiemstra, H.** 2004. Rapid environmental change in African and South American tropics around 4000 years before present: a review. *Earth Sc. Rev.* 66, 217-260.
- Marin, D., Bayona, G.** 2007. Foraminíferos y radiolarios holocénicos de la Cuenca de Panamá. Proyecto de Grado. Universidad EAFIT, Depto. de Geología. Medellín.
- Markgraf, V., Diaz, H.F.** 2000. The past ENSO record: A synthesis. In: H.F. Diaz, V. Markgraf (eds.) *El Niño and the Southern Oscillation*, Cambridge Univ. Press, 465-488.
- Martin, L., Fournier, M., Mourguiart, P., Sifeddine, A., Turq, B., Absy, M.L., Flexor, J.-M.** 1993. Southern Oscillation signal in South America paleoclimate data of the last 7000 years. *Quat. Res.* 39, 338-346.
- Martínez, J.I., De Deckker, P., Chivas, A.** 1997. New estimates for salinity changes in the Western Pacific Warm Pool during the Last Glacial Maximum: oxygen isotope evidence. *Mar. Micropaleontology* 32, 311-340.
- , —————, **Barrows, T.** 1999. Paleoceanography of the eastern Indian Ocean near Australia during the last 30 ky with emphasis on the Last Glacial Maximum: Planktonic foraminiferal evidence. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 147, 73-99.
- , **Keigwin, L., Barrows, T.T., Yokoyama, Y., Southon, J.** 2003. La Niña-like conditions in the eastern Equatorial Pacific and a stronger Choco jet in the northern Andes during the last glaciation. *Paleoceanography* 18(2), 1033, doi:10.1029/2002PA000877.
- , **Lopez, E.** 2005. El sistema fluvial del Magdalena durante el Plioceno – Pleistoceno: contexto tectónico y escenario paleoclimático. En Restrepo, J.D. Ed., “Los sedimentos del Río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental”. Editorial Universidad EAFIT, 101-112.
- , **Rincon, D., Yokoyama, Y., Barrows, T.** 2006. Foraminifera and coccolithophorid assemblage changes in the Panama Basin during the last deglaciation: response to sea-surface productivity induced by a transient climate change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234, 114-126.
- , **Mora, G., Barrows, T.T.** 2007. Paleoceanographic conditions in the western Caribbean Sea for the last 560 kyr as inferred from planktonic foraminifera. *Mar. Micropal.* 64, 177-188.

- _____, **Yokohama, Y., Gómez, A., Delgado, A., Matsuzaki, H., Rendón, E.** 2010. Late Holocene siliciclastic and carbonate terraces of the Cartagena region, southern Caribbean: the product of the ITCZ migration, coastal accretion, and neotectonics. *J. South Am. Earth Sc.* 29, 214-224.
- _____, **Suter, F., Bayona, G., Londoño, C., Marin, D., Yokoyama, Y., Barrows, T., Collot, J.-Y.** 2009b. The Quaternary record of the El Niño phenomenon in northern South America. PAGES Open Science Meeting, 7-12 Julio, Corvallis, USA.
- _____, _____, **García, Y., Lopez, S., Velez, M.I., Escobar, J., Yokoyama, Y., Battarbee, R., Jones, V.** 2009c. El Paleolago Cauca: un registro único, laminado lacustre-fluvial, del Holoceno tardío en el norte de Suramérica. XII Congr. Col. Geol. Paipa, Sept. 7-11.
- Mekik, F., Francois, R.** 2007. Tracing deep-sea calcite dissolution: Agreement between the Glorotalia menardii fragmentation index and elemental ratios (Mg/Ca and Mg/Sr) in planktonic foraminifera. *Paleoceanography* 21, PA4219, doi:10.1029/2006 PA001296.
- Mesa, O., Poveda, G., Carvajal, I.F.** 1997. Introducción al Clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 390 p.
- Mix, A.C.** 2006. Running hot and cold in the eastern equatorial Pacific. *Quat. Sci. Rev.* 25, 1147-1149.
- Molnar, P.** 2004. Late Cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment: How Might Climate Change Have Affected Erosion Rates? *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 32, 67-89.
- _____, **England, P.** 1990. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? *Nature* 346, 29-34.
- _____, **Cane, M.A.** 2002. El Niño's tropical climate and teleconnections as a blueprint for pre-Ice Age climates. *Paleoceanography* 17 (2), 10.1029/2001 PA000663.
- _____, _____. 2007. Early Pliocene (pre-Ice Age) El Niño-like global climate: Which El Niño? *Geosphere* 3(5), 337-365.
- Montgomery, D.R., Balco, G., Willett, S.D.** 2001. Climate, tectonics, and the morphology of the Andes. *Geology* 29, 579-582.
- Mora, G., Martínez, J.I.** 2005. Sedimentary metal ratios in the Colombia Basin as indicators for water balance change in northern South America during the past 400,000 years *Paleoceanography* 20, PA4013, doi: 10.1029/2005PA001132.
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Sobel, E.R., Hooghiemstra, H., Torres, Vallejo, J.** 2008. Climatic forcing of asymmetric orogenic evolution in the Eastern Cordillera of Colombia. *GSA Bulletin* 120 (7/8), 930-949.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T., Anderson, D.M.** 2002. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature* 420, 162-165.
- Niebler, H.-S., Arz, H.W., Donner, B., Mulitza, S., Patzold, J., Wefer, G.** 2003. Sea surface temperatures in the equatorial and South Atlantic Ocean during the last glacial maximum (23-19 ka). *Paleoceanography* 18:1069, doi: 10.1029/2003PA000902.
- Ortlieb, L.** 2000. The documentary historical record of past El Niño events in Peru: An update of Quinn record (Sixteenth through Nineteenth Centuries). In: H.F. Diaz, V. Margraf (eds.), *El Niño and the Southern Oscillation*. Cambridge Univ. Press. 207-296.
- Otto-Bliesner, B.L., Brady, E.C., Shin, S.-I., Liu, Z., Shields, C.** 2003. Modeling El Niño and its teleconnections during the last glacial-interglacial cycle. *Geoph. Res. Lett.* 30(23), 2198. Doi: 10.1029/2003GL018553.
- _____, _____, **Schneider, R., Brady, E.C., Kucera, M., Abe-Ouchi, A., Bard, E., Braconnot, P., Crucifix, M., Hewitt, C.D., Kageyama, M., Marti, O., Paul, A., Rosell-Melé, A., Waelbroeck, C., Weber, S.L., Weinelt, M., Yu, Y.** 2009. A comparison of PMIP2 model simulations and the MARGO proxy reconstruction for tropical sea surface temperatures at the last glacial maximum. *Clim. Dyn.* 32, 799-815.
- Page, W., Mattson, L.** 1981. Landslide lakes near Santa Fe de Antioquia. *Rev. CIAF* 6(1-3), 469-478.
- Pahnke, K., Sachs, J. P., Keigwin, L., Timmermann, A., Xie, S.-P.** 2007. Eastern tropical Pacific hydrologic changes during the past 27,000 years from D/H ratios in alkenones. *Paleoceanography* 22, PA4214, doi:10.1029/2007PA001468.
- Parrish, J.T.** 1998. Interpreting Pre-Quaternary Climate from the Geologic Record. Columbia Univ. Press, New York, 338 pp.
- Peterson, L. C., Haug, G. H.** 2006. Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234, 97-113.
- Philander, S.G.** 1983. El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature* 302, 295-301.
- Pope, K.O., Pohl, M.E.D., Jones, J.G., Lentz, D.L., von Nagy, C., Vega, F.J., Quitmyer, I.R.** 2001. Origin and environmental setting of ancient agriculture in the lowlands of Mesoamerica. *Science* 292, 1370-1373.
- Poveda, G.** 2001. El Chorro del Chocó y su influencia sobre la hidroclimatología de la costa Pacífica y el occidente de Colombia. En: I.D. Correa, J.D. Restrepo (eds.) *Geología y Oceanografía del delta del Río San Juan*. COLCIENCIAS – Universidad EAFIT, 167-187.
- _____, **Mesa, O.J.** 2000. On the existence of Lloro (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet, *Geoph. Res. Letters* 27, 1675-1678.
- _____, **Waylen, P.R., Pulwarty, R.S.** 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 234, 3-27.
- Quinn, W.H., Neal, V.T., Antúnez de Manolo, S.** 1987. El Niño occurrences over the past four and a half centuries. *J. Geophys. Res.* 92(C13), 14449-14461.
- Ramanathan, V., Collins, W.** 1991. Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Niño. *Nature* 351, 27-32.

- Ravelo, A.C., Andreasen, D.H., Lyle, M., Olivarez Lyle, A., Wara, M.W.** 2004. Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch. *Nature* 429, 263-267.
- , **Dekens, P.S., McCarthy, M.** 2006. Evidence for El Niño-like conditions during the Pliocene. *GSA Today* 16(3), 4-10.
- Rein, B., Lückge, A., Sirocko, F.** 2004. A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period. *Geophys. Res. Lett.* 31, L17211, doi:10.1029/2004GL020161.
- , ———, **Reinhardt, L., Sirocko, F., Wolf, A., Dullo, W.-C.** 2005. El Niño variability off Peru during the last 20,000 years. *Paleoceanography* 20, PA4003, doi:10.1029/2004PA001099.
- Restrepo-Moreno, S.A., Foster, D.A., Stockli, D.F., Parra, L.N.** 2009. Long-term erosion and exhumation of the "Altiplano Antioqueño", Northern Andes (Colombia) from apatite (U-Th)/He thermochronology. *Earth Planet. Sc. Lett.* 278 (1-2), 1-12.
- Rickaby, R.E.M., Halloran, P.** 2005. Cool La Niña During the Warmth of the Pliocene? *Science* 307, 1948-1952.
- Riedinger, M.A., Stinitz-Kannan, M., Last, W.M., Brenner, M.** 2002. A 6100 ¹⁴C record of El Niño activity from the Galápagos Islands. *J. Paleolimnology* 27, 1-7.
- Rincon, D., Martínez, J.I.** 2004. El evento Younger Dryas en el norte de Suramérica. *Boletín de Geología UIS*, 26(42), 39-55.
- Rodbell, D.T., Seltzer, G.O., Anderson, D.M., Abbott, M.B., Enfield, D.B., Newman, J.H.** 1999. An 15,000-year record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador. *Science* 22, 516-520.
- Rosenthal, Y., Broccoli, A.** 2004. In search of Paleo-ENSO. *Science* 304, 219-221.
- Ruiz, O., Sánchez, D.P., Parra, C.E.** 2005. Un registro holocénico de alta resolución: los lodos de La Batea, Santa Fé de Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 17, 109-116.
- Sandweiss, D.H., Richaardson, J.B., Reitz, E.J., Rollins, H.B., Maasch, K.A.** 1996. Geoaerchological evidence from Peru for a 5,000 year BP onset of El Niño. *Science* 273, 1531-1533.
- Schmittner, A., Appenzeller, C., Stocker, T.F.** 2000. Enhanced Atlantic freshwater export during El Niño. *Geophys. Res. Lett.* 27, 1163-67.
- Shin, S.-I., Liu, Z., Otto-Bliesner, B., Brady, E.C., Kutzbach, J.E., Harrison, S.P.** 2003. A simulation of the Last Glacial Maximum climate using the NCAR-CCSM. *Clim. Dyn.* 20, 127-151.
- Steph, S., Tiedemann, R., Groeneveld, J., Sturm, A., Nürnberg, D.** 2005. Pliocene changes in tropical east Pacific upper ocean stratification: Response to tropical gateways. In: R. Tiedemann, A.C. Mix, C. Richter, W.F. Ruddiman (eds.) *Proceed. Ocean Drilling Program, Scientific Results* 202, 1-51.
- , ———, **Prange, M., Groeneveld, J., Nürnberg, D., Reuning, L., Schulz, M., Haug, G.H.** 2006. Changes in Caribbean surface hydrography during the Pliocene shoaling of the Central American Seaway. *Paleoceanography* 21, 1-25.
- Stott, L., Poulsen, C., Lund, S., Thunell, R.** 2002. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales. *Science* 297, 222-226.
- , **Cannariato, K., Thunell, R., Haug, G.H., Koutavas, A., Lund, S.** 2004. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature* 431, 56-59.
- Stute, M., Forster, M., Frischkorn, H., Serejo, A., Clark, J.F., Schlosser, P., Broecker, W.S., Bonani, G.** 1995. Cooling of tropical Brazil (5°C) during the Last Glacial Maximum. *Science* 269, 379-383.
- Sun, D.-Z.** 2000. Global climate change and El Niño: A theoretical framework. In: H.F. Diaz, V. Markgraf (eds.) *El Niño and the Southern Oscillation*, Cambridge Univ. Press, 443-463.
- Tedesco, K., Thunell, R.** 2003. High resolution tropical climate record for the last 6,000 years. *Geophys. Res. Lett.* 30(17), 1891, doi:10.1029/2003GL017959.
- Teusch, K.P., Jones, D.S., Allmon, W.D.** 2002. Morphological variation in Turritellid gastropods from the Pleistocene to Recent of Chile: Association with upwelling intensity. *Palaios* 17(4), 366-377.
- Thouret, J.-M., van der Hammen, T., Salomons, B., Juvigne, E.** 1997. Late Quaternary glacial stades in the Cordillera Central, Colombia, based on glacial geomorphology, tephra-soil stratigraphy, palynology, and radiocarbon dating. *J. Quaternary Sc.* 12, 347-369.
- Timmermann, A., Okumura, Y., An, S.I., Clement, A., Dong, B.** 2007. The Influence of a weakening of the Atlantic meridional overturning circulation on ENSO. *J. Clim.* 20, 4899-9190.
- Toro, G.E., Rendón, D.A., Montes, L.** 2008. Levantamiento de los Andes en el norte de la Cordillera Central de Colombia: Una aproximación geomorfológica, estructural y cronológica (trazas de fisión). *Bol. Ciencias Tierra* 22, 125.
- Trenberth, K.E., Otto-Bliesner, B.L.** 2003. Toward integrated reconstruction of past climates. *Science* 300, 589-591.
- Tsuchi, R.** 2002. Neogene evolution of surface marine climate in the Pacific and notes on related events. *Revista Mexicana de Ciencias Geol.* 19(3), 260-270.
- Tudhope, A.W., Cillcott, C.P., McCulloch, M.T., Cook, E.R., Chappell, J., Ellam, R.M., Lea, D.W., Lough, J.M., Shimmield, G.B.** 2001. Variability of the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle. *Science* 291, 1511-1517.
- Tziperman, E., Farrell, B.** 2009. Pliocene equatorial temperature: Lessons from atmospheric superrotation. *Paleoceanography* 24, PA1101, doi:10.1029/2008 PA001652.
- Valdes, P.J.** 2000. South American palaeoclimate model simulations: how reliable are the models? *J. Quat. Sc.* 15(4), 357-368.
- Van der Hammen, T.** 1984. Fluctuaciones holocénicas del nivel de inundaciones en la Cuenca del Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge (Colombia). *Geología Norandina*, 10, 11-18.
- , **Werger, J.H., Van Dommelen, H.** 1973. Palynological 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. *The Quaternary of Colombia* 2, 1-121.
- _____, **Cleff, A.M.** 1992. Holocene changes of rainfall and river discharge in northern South America and the El Niño phenomenon. *Erdkunde* 46, 252-256.
- _____, **Hooghiemstra, H.** 1995. The El Abra stadial, a Younger Dryas equivalent in Columbia. *Quat. Sc. Rev.* 14, 841-851.
- _____, **Hooghiemstra, H.** 2000. Neogene and Quaternary history of vegetation, climate, and plant diversity in Amazonia. *Quat. Sc. Rev.* 19, 725-742.
- Velásquez, C.A.** 2005. Paleoecología de alta resolución del Holoceno tardío en el Páramo de Frontino, Antioquia. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 299 p.
- Vélez, M.I., Hooghiemstra, H., Metcalfe, S., Wille, M., Berrío, J.C.** 2006. Late Glacial and Holocene environmental and climatic changes from a limnological transect through Colombia, northern South America. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.* 234, 81-96.
- Wara, M.W., Ravelo, A.C., Delaney, M.L.** 2005. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period. *Science* 309, 758-761.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K.** 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science* 292, 686-693.
- Zaric, S., Donner, B., Fischer, G., Mulitza, S., Wefer, G.** 2005. Sensitivity of planktonic foraminifera to sea surface temperature and export production as derived from sediment trap data. *Mar. Micropaleontology* 55, 75-105.
- Zebiak, S.E., Cane, M.A.** 1987. A model El Niño – Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* 115, 2262-2278.
- Zheng, W., Braconnot, P., Guilyardi, E., Merkel, U., Yu, Y.** 2008. ENSO at 6ka and 21ka from ocean-atmosphere couple model simulations. *Clim. Dyn.* 30, 745-762.

Recibido: julio 24 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2009.

CIMENTACIÓN DE LA FÓRMULA EMPÍRICA DE ÅNGSTRÖM REFERENTE A LA RADIACIÓN ATMOSFÉRICA EN SUPERFICIE

*A la memoria de Jesús A. Eslava Ramírez,
quien con celo patrio impulsó la meteorología académica en Colombia*

Por

Joaquín Pelkowski¹

Resumen

Pelkowski, Joaquín: Cimentación de la fórmula empírica de Ångström referente a la radiación atmosférica en superficie. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33** (129): 513-527, 2009. ISSN 0370-3908.

En muchos campos prácticos, agrometeorología en particular, es preciso estimar la radiación atmosférica que llega al suelo, sobre la base de elementos meteorológicos de fácil acceso. La temperatura y humedad relativa, registradas regularmente al nivel de las garitas meteorológicas, han servido como parámetros de entrada en fórmulas empíricas que facilitan la estimación de la radiación devuelta por la atmósfera. Una de tales fórmulas, clásica como otras que llevan el nombre de su artífice, es la de Ångström. Las tentativas de fundamentarla teóricamente no son convincentes. En este ensayo se intenta nuevamente una fundamentación, partiendo de un modelo bipotámico de radiación infrarroja atmosférica.

Palabras clave: radiación atmosférica (nocturna), irradiación infrarroja, fórmula empírica de Ångström.

Abstract

In many fields of practice, like agrometeorology, there is a need to estimate the downwelling radiation at the surface, on the basis of meteorological parameters of easy access. Air temperature and relative humidity, which are regularly measured at shelter height, have

¹ JRG Dynamical Systems, KlimaCampus, University of Hamburg, Germany. Email: Joachim.Pelkowski@zmaw.de

served as the entries in empirical formulae laid down in estimating the air's radiation returned to earth. One such classic formula bears Ångström's name. Attempts to derive it from theory have not been convincing. This essay offers a fresh attempt, starting from a two-stream model of infrared radiation.

Keywords: (Nighttime) downwelling longwave radiation, infrared irradiance, Ångström's empirical formula.

1. Introducción

La radiación atmosférica, emitida hacia la superficie terrestre en el régimen infrarrojo de ondas largas, es una parte sustancial en el balance energético al nivel del suelo. A este "efecto atmosférico", general y popularmente conocido como "efecto invernadero", se deben las placenteras condiciones de habitabilidad sobre la Tierra.

Un aumento paulatino a largo plazo de ese "contraflujo" constituye la esencia del problema del calentamiento global.

No obstante, el flujo "devuelto" por la atmósfera en cualquier momento es de interés más inmediato, en agrometeorología por ejemplo, puesto que aminora el enfriamiento del suelo por radiación durante la noche, o para el pronóstico de niebla en un aeropuerto.

Hoy por hoy se dispone de elaborados y precisos modelos para calcular dicho flujo descendente, pero su utilidad en la práctica continúa siendo muy restringida. Y en lo que respecta a su medición en superficie, raras son las estaciones que disponen del presupuesto que permita mantener y calibrar los costosos instrumentos de medición, necesarios para verificar los cálculos.

Los archivos actuales de las medidas en superficie de la radiación infrarroja proveniente de la atmósfera, de buena calidad y alta resolución temporal, distan de ser suficientes en su extensión geográfica y la duración de las series cronológicas. Existen en el mundo entero apenas tres docenas de estaciones certificadas para su medición exacta (Vardavas & Taylor, 2007). Incluso las observaciones desde satélite precisan, para su verificación, de mediciones locales. Por estas razones, no dejan de tener interés fórmulas empíricas que indirectamente permitan estimar la radiación de onda larga incidente en la superficie de algún lugar determinado.

Hace décadas se idearon con tal fin unas primeras fórmulas empíricas que partían de observaciones realizadas en superficie, y se establecieron unas expresiones sencillas en las que intervienen únicamente la temperatura y la cantidad de vapor de agua cerca del suelo.

Es obvio que una aproximación teórica al problema debería tener en cuenta muchas más variables que éstas. Sin embargo, dichas fórmulas resultaron ser medios notablemente eficaces para estimar la irradiación infrarroja en superficie. De las diversas fórmulas propuestas (véanse, p. ej., las resumidas por Sellers, 1965; Brutsaert, 1982, o una propuesta por Elsasser, 1942), la mayoría de ellas en función de la temperatura y la presión del vapor, no discutiremos sino dos, en virtud de su carácter modélico.

Sobre la base de propias y extensas observaciones nocturnas realizadas en Aragón y California, publicadas en 1915, Anders Ångström (1888-1981), famoso miembro de la dinastía sueca de los expertos en radiación atmosférica, sacó las siguientes conclusiones acerca de la radiación infrarroja medida al nivel del suelo (Ångström, 1916): I) Las variaciones de la contrarradiación de las capas inferiores de la atmósfera son causadas directamente por variaciones de la temperatura y la humedad. II) La contrarradiación atmosférica es casi proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (T_a) en el lugar de la observación. III) La dependencia de la contrarradiación (R^{\downarrow}) de la tensión del vapor de agua (e) se puede expresar por la fórmula exponencial (incorporando la segunda conclusión):

$$R_{\text{sup}}^{\downarrow} = \sigma T_a^4 (a_A - b_A \times 10^{-\tau}) (0.5 < e < 12 \text{ mm}). \quad (1)$$

IV) Un aumento de la tensión del vapor causa una disminución en la emisión efectiva. V) Las observaciones sugieren que la atmósfera seca ($e < 1 \text{ mm}$) posee un poder de radiación importante: a la altura de 4400 metros alcanza la radiación (devuelta) casi el 50% de la magnitud de radiación de un cuerpo negro a la temperatura del lugar de

observación. VI) Variaciones en la radiación de ondas cortas transmitida por la atmósfera apenas influyen en la magnitud de la contrarradiación. (Aclaro que el término de "contrarradiación", muy estilado en la época, ha caído en desuso.)

En 1932 Brunt propone una nueva fórmula empírica, que según él se ajustaba mejor a unos datos específicos recogidos en Inglaterra:

$$r^{\downarrow} = a_B + b_B \sqrt{e}. \quad (2)$$

Introducimos desde ahora, siguiendo la costumbre de la mayoría de los autores que discuten la fórmula, el cociente

$$r^{\downarrow} = \frac{R_{\text{sup}}^{\downarrow}}{\sigma T_a^4}, \quad (3)$$

que Brutsaert (1982) llama ambiguamente la "emisividad atmosférica con el cielo despejado", pero es preferible denominarlo "contraflujo relativo", siendo $R_{\text{sup}}^{\downarrow}$ el flujo infrarrojo descendente en superficie (más adelante, $R_{\text{sup}}^{\downarrow}$ se reemplazará por $R^{\downarrow}(\tau_0^{\downarrow})$, donde el argumento se refiere a la profundidad óptica total de la atmósfera en régimen de ondas largas).

En estas fórmulas, $e = p_v(0)$ significa la presión del vapor de agua cerca de la superficie, y a_A , b_A , γ , a_B y b_B son las "constantes" de las fórmulas empíricas. La fórmula de Brunt tiene la ventaja de depender de solamente dos "constantes", pero por otro lado no está sostenida por consideraciones tan claras como las de Ångström (Raman, 1935). El mismo Brunt la consideraba una mera fórmula empírica, a despecho de una tentativa de derivarla por vía teórica (Pekeris, 1935).

La fórmula de Ångström (1) se puede reescribir de la siguiente manera (Raman, 1935):

$$r^{\downarrow} = (a_A - b_A) + b_A(1 - 10^{-\gamma e}),$$

siendo aproximadamente $a_B = a_A - b_A$. Siguiendo a Raman (1935), $b_A(1 - 10^{-0.405 e}) \sim 0.06\sqrt{e}$ para valores típicos de la presión del vapor de agua. En vista de esta posibilidad y del hecho de que la fórmula de Brunt es considerada como una mera expresión empírica sin fundamento teórico (Brutsaert, 1982), de ahora en adelante me ceñiré a establecer, por vía teórica, la fórmula

de Ångström. No hicieron falta, claro está, tentativas de justificarla teóricamente, incluso de la misma pluma de Ångström, pero no cabe calificarlas de concluyentes.

Nuestro enfoque en este ensayo es deducir, en la medida de lo posible, la fórmula empírica (1), partiendo de un modelo hipotámico de corte inicialmente introducido en meteorología por Emden (1913). Este esfuerzo fue inspirado por una tentativa de cimentar la no menos célebre fórmula empírica de Ångström que permite estimar la irradiación solar, o insolación, en función de la heliofanía (Polkowski, 2009).

Hoy se calcula la irradiación infrarroja en superficie a partir de la teoría fenomenológica de transferencia radiativa de Chandrasekhar (1950), quien sintetizó los dispersos esfuerzos previos en su magistral exposición, ofreciendo una teoría coherente y pormenorizada de los intercambios radiativos que tienen lugar dentro de una atmósfera estelar, en términos de la longitud de onda, la polarización y la dirección de las ondas electromagnéticas que la atraviesan. Esta teoría presupone, en su aplicación a nuestro problema, los perfiles de temperatura y vapor de agua en un lugar dado, amén de información detallada sobre el espectro de absorción del vapor de agua y de los gases que absorben radiación infrarroja. En la práctica no se cuenta con la información necesaria sino en ciertas estaciones meteorológicas o en casos excepcionales, mientras que para ciertos fines, como el pronóstico de las heladas o de las nieblas, es deseable disponer de una estimación de la radiación infrarroja proveniente de la atmósfera, a partir de mediciones meteorológicas asequibles (en superficie). Por consiguiente, las fórmulas empíricas siguen gozando de cierta popularidad, e incluso se plantean nuevas fórmulas, para satisfacer las necesidades de ciertos grupos, dedicados a objetivos más limitados.

2. Modelación de los flujos infrarrojos

Para calcular de manera elemental los flujos infrarrojos que atraviesan perpendicularmente la atmósfera, basta recurrir a la clase de los modelos hipotámicos. En particular, a continuación

nos basaremos en una versión propuesta recientemente (Pelkowski, 2007), especializada con vistas a describir una atmósfera semigris, transparente a la radiación solar. Bajo este supuesto, las ecuaciones diferenciales que determinan los flujos de onda larga son (Pelkowski, 2007, § 4):

$$\bar{\mu}^+ \frac{dR^{\downarrow}(\tau)}{d\tau} = R^{\downarrow}(\tau) - \pi B(\tau)$$

$$\bar{\mu}^+ \frac{dR^{\uparrow}(\tau)}{d\tau} = -R^{\downarrow}(\tau) + \pi B(\tau).$$

$R^{\downarrow}(\tau)$, $R^{\uparrow}(\tau)$ y $B(\tau)$ simbolizan, respectivamente, la densidad del flujo infrarrojo ascendente, del flujo infrarrojo descendente y la función fuente en el infrarrojo. La profundidad óptica en el infrarrojo se define como de costumbre:

$$\tau(z) = \int_z^{H_0} \rho k dz', \quad (4)$$

significando ρ la densidad de los gases que absorben radiación infrarroja, k el coeficiente de absorción específico (por unidad de masa), z la altura sobre el nivel del mar, y H_0 una altura donde la densidad del aire se pueda considerar como despreciable ("altura de la atmósfera"). En las ecuaciones generales del modelo bipotámico presentado en el trabajo citado, optamos por cosenos directores de igual magnitud ($\mu_+^* = -\mu_-^* \equiv \bar{\mu}^+$), con $\bar{\mu}^+$ función de la profundidad óptica total, $\tau_0 \equiv \tau(0)$: $\bar{\mu}^+(\tau_0)$. La determinación, algo engorrosa, de este coseno efectivo nos llevaría demasiado lejos en esta exposición, por lo que suponemos el valor constante $\bar{\mu}^+(\tau_0) = 0.6$, valor intermedio entre $\bar{\mu}^+(0) = 0.5$ para una atmósfera enteramente transparente ($\tau_0 = 0$) y $\bar{\mu}^+(\infty) = 2/3$ para una atmósfera suficientemente opaca en el infrarrojo. En el contexto de este artículo, es posible prescindir de un ajuste de este coseno con miras a reproducir un valor exacto para un límite dado.

Introduciendo la profundidad óptica efectiva (o dilatada) mediante la definición $\tau^* = \tau/\bar{\mu}^+(\tau_0)$, las ecuaciones anteriores se pueden expresar de la forma siguiente:

$$\frac{dR^{\downarrow}(\tau^*)}{d\tau^*} = R^{\downarrow}(\tau^*) - \pi B(\tau^*) \quad (5)$$

$$\frac{dR^{\uparrow}(\tau^*)}{d\tau^*} = -R^{\downarrow}(\tau^*) + \pi B(\tau^*). \quad (6)$$

Integrándolas en seguida con respecto a τ^* , se obtienen las densidades formales de los flujos descendente y ascendente:

$$R^{\downarrow}(\tau^*) = R^{\downarrow}(\tau_0^*)e^{-\tau_0^* - \tau^*} + \pi \int_{\tau_0^*}^{\tau^*} e^{-(\tau_0^* - \tau')} B(\tau') d\tau' \quad (7)$$

$$R^{\uparrow}(\tau^*) = R^{\uparrow}(0)e^{-\tau^*} + \pi \int_0^{\tau^*} e^{-(\tau_0^* - \tau')} B(\tau') d\tau'. \quad (8)$$

Díceseles formales porque la función fuente B depende de la temperatura, la cual, a su vez, depende de los flujos de radiación, entre otros procesos. Aplicadas a toda la atmósfera, las condiciones de frontera son:

$$R^{\downarrow}(0) = 0, \quad (9)$$

$$R^{\uparrow}(\tau_0^*) = \epsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \epsilon_s) R^{\downarrow}(\tau_0^*). \quad (10)$$

Significan: σ , la constante de Stefan-Boltzmann; T_s , la temperatura de la superficie terrestre (tierra o agua); ϵ_s , la emisividad gris de ésta y albedo infrarrojo igual a $1 - \epsilon_s$. La atmósfera no recibe radiación infrarroja en su frontera superior, mientras que la superficie emite como un cuerpo gris (casi negro, por regla general, para el cual $\epsilon_s = 1$).

El flujo que aquí interesa primordialmente es la irradiancia (infrarroja) en superficie (otrotra llamada contrarcorriente), o sea, el flujo descendente en el nivel donde $\tau^* = \tau_0^*$:

$$R^{\downarrow}(\tau_0^*) = \pi \int_0^{\tau_0^*} e^{-(\tau_0^* - \tau')} B(\tau') d\tau'. \quad (11)$$

En equilibrio termodinámico local, se tiene $\pi B(\tau^*) = \sigma T^4(\tau^*)$. Queda así patente que la irradiancia en superficie depende de la distribución vertical de la temperatura, $T(\tau^*)$, y, a través de τ_0^* , de los perfiles verticales de la densidad o concentración de los gases atmosféricos que absorben la radiación infrarroja, entre ellos el dióxido de carbono y el ozono, cuyas concentraciones pueden suponerse constantes a corto plazo, mas no a la del vapor de agua.

Un sondeo vertical a cierta hora permite establecer tanto el perfil de temperatura reinante en ese momento como el de la humedad relativa, del cual se deduce la repartición vertical del vapor de agua, el gas más variable de todos los que absorben en el infrarrojo. Si se dispone de esta

información, la ecuación (11) se podría integrar numéricamente y el objetivo de nuestra tarea actual quedaría burlado.

No obstante, a menudo se carece de la información necesaria, y el objetivo es entonces estimar la radiación atmosférica en superficie prescindiendo precisamente de los sondeos, y aprovechando en su lugar variables de fácil acceso, como la temperatura y la humedad relativa, que regularmente se observan al nivel del suelo (de hecho, en la garita meteorológica a menos de dos metros de éste). Para lograrlo, ya sabemos que se suele recurrir a las fórmulas empíricas de Ångström o de Brunt, o incluso a las menos difundidas que se han propuesto desde entonces (Brutsaert, 1982). Pero si consiguiéramos tender un puente entre (11) y una de las fórmulas clásicas, reforzaríamos nuestra confianza en ella. Veamos si es posible llevar a cabo tal empresa con respecto a la fórmula de Ångström, arrancando de la ec. (11).

3. Perfil de temperatura semiteórico

En trabajos anteriores (véase por ejemplo, Anduckia & Pelkowski, 2000; Pelkowski et al. 2008), ha sido posible deducir unas expresiones analíticas de la distribución de temperaturas con la altura para una atmósfera (semigris) en equilibrio radiativo local, pese a que esta condición no se cumple en la troposfera. En el caso de la estratosfera, un perfil en equilibrio radiativo local es una lógica primera aproximación al perfil realmente observado, y por lo tanto supondremos que la estratosfera de nuestro modelo se encuentra en equilibrio radiativo. En cambio, para la troposfera, en donde la convección (diurna) y la liberación de calor por condensación modifican netamente el perfil del equilibrio radiativo, no es lícito presuponer esta condición. Hasta ahora, no se ha logrado calcular analíticamente un perfil troposférico de temperaturas, de manera que no queda otro remedio que recurrir a un perfil estándar, o resignarnos a definir por lo menos un perfil que se parezca a éste o a los perfiles medios normalmente observados. Un tal perfil es, implícitamente, producto de todos aquellos procesos que mencionáramos hace un momento. En este sentido, representa un perfil promedio realista.

Hemos optado por definir el siguiente perfil (Pelkowski, 1994):

$$T(\tau^*) = \begin{cases} T_{e,f}(a + b\tau^*)^{1/4} & 0 \leq \tau^* \leq \tau_{tr}^*, \\ T_s \left(\frac{\tau^*}{\tau_0^*}\right)^{1/16} & \tau_{tr}^* \leq \tau^* \leq \tau_0^*. \end{cases} \quad (12)$$

τ_{tr}^* designa la profundidad óptica de la estratosfera, siendo τ_0^* la profundidad óptica de la atmósfera en conjunto. $T_{e,f}$ es una temperatura efectiva de la atmósfera, definida mediante la radiación emergente en el tope de la atmósfera: $\sigma T_{e,f}^4 \equiv R^{\downarrow}(0)$. Para pasar al espacio geométrico de alturas z , nos serviremos de la relación

$$\tau(z) = \tau_0 e^{-z/H_p}, \quad (13)$$

donde $H_p \sim 2.5$ km es la altura de una atmósfera de vapor de agua homogénea. La relación es válida para el vapor de agua (Goody & Yung, 1989) y está basada en la ley de Ham, quien la estableció hace más de un siglo para la atmósfera de latitudes medias, pero que hoy en día no se recuerda como tal.

En la Figura 1 se puede apreciar el perfil (12), con $a = b = 0.5$, $\tau_{tr}^* = 0.0316$, $\tau_0^* = 3$, $T_s = 288$ K y $T_{e,f} = 254.4$ K (el valor de τ_{tr}^* resulta de la condición de continuidad de temperaturas en la tropopausa).

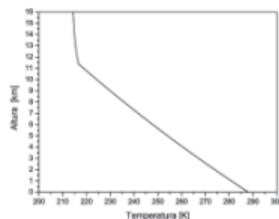


FIGURA 1. Distribución vertical de temperatura semejante a la de la atmósfera estándar

La distribución (12) se caracteriza, en términos de la altura, por un comportamiento casi lineal en

la troposfera ($0 \leq z \leq H_T = 11.38$ km) y una estratosfera ($H_T \leq z \leq H_s$) casi isotérmica. El declive medio de la temperatura es un poco inferior al de la troposfera estándar, cuyo valor constante es igual a 6.5 K/km. **Brutsaert** (1982) utiliza un perfil parecido para toda la atmósfera. La ventaja de la expresión (12) es que permite evaluar la integral en (11), mientras que una función lineal de la altura z se convierte en una función logarítmica de τ en el espacio óptico. También podemos considerar el caso más general de un perfil troposférico cuasi-lineal variable, simplemente introduciendo en el exponente un parámetro ω tal que el tramo troposférico sea descrito por

$$T(\tau) = T_s \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-\omega/16} \quad (14)$$

La temperatura que interviene en las fórmulas empíricas de la introducción es la del aire, medida al nivel de la garita meteorológica; si la designamos por T_a , y a la profundidad óptica correspondiente por τ_{aerita} es $\tau_0 - \epsilon$, siendo $\epsilon \ll 1$, tendremos la relación

$$\sigma T_a^4 = \sigma T_s^4 \left(1 - \frac{\epsilon}{\tau_0} \right)^{-\omega/16} \approx \sigma T_s^4 \quad (15)$$

entre la temperatura de la superficie y la temperatura del aire junto al suelo. La aproximación es aceptable, a menos que la diferencia entre ambas temperaturas sea notable, como es el caso en circunstancias excepcionales (**Sellers**, 1965).

El perfil de la estratosfera se tomó aquí de una solución aproximada de una capa en equilibrio radiativo y se expresa así:

$$T(\tau) = T_{s2}(a + b\tau)^{1/4} \quad (16)$$

los coeficientes $a(\tau_0)$ y $b(\tau_0)$ se pueden determinar por diferentes vías (**Pelkowski**, 1993; **Anduckin & Pelkowski**, 2000). Esta solución no incluye la absorción de radiación solar debida a la presencia del ozono en la estratosfera, pero se podría ampliar para tenerla en cuenta. En el apéndice A emplearemos los coeficientes que resultan de la solución exacta a una ecuación integral aproximada. La solución completamente rigurosa del equilibrio radiativo con absorción de radiación solar y esparcimiento isotrópico se ha publicado recientemente (véase su aplicación a la atmósfera terrestre en **Pelkowski et al.**,

2008), pero es demasiado elaborada para nuestro propósito actual. Por lo demás, como se demostrará en el apéndice A, el estado térmico de la estratosfera escasamente influye en la irradiación en superficie, y por lo tanto se puede descartar.

4. Profundidad óptica

Hemos de examinar ahora detenidamente la profundidad óptica del vapor de agua, para lo cual se parte de la definición de la profundidad óptica de la atmósfera entera, ec. (4):

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \tau(0) = \int_0^{H_s} \rho k dz \\ &= \int_0^{H_T} \rho k dz + \int_{H_T}^{H_s} \rho k dz \\ &= \int_0^{H_T} (\rho_v k_v + \rho_d k_d) dz + \tau_{\text{str}} \\ &= \tau_{\text{vapor}} + \tau_{\text{aer}}, \end{aligned} \quad (17)$$

donde ρ_v es la densidad del vapor de agua contenido en el aire, k_v su coeficiente de absorción. $k_d = \sum_i \sum_j \frac{d_{ij}}{\rho_i \rho_j}$ representa el coeficiente de absorción de los demás gases activos en el espectro infrarrojo. En el modelo presente podemos suponer la profundidad óptica de la atmósfera seca como relativamente invariable, es decir, $\tau_{\text{aer}} = \tau_0 + \int_0^{H_T} \rho_d k_d dz$ es constante, siendo $\tau_0 = \int_0^{H_s} \rho k dz$ la contribución a la profundidad total debida a la absorción de radiación infrarroja por parte de los gases traza de la estratosfera (CO_2 y O_3). El coeficiente de absorción efectivo del vapor de agua (k_v) es independiente de la longitud de onda, puesto que en un modelo elemental como el nuestro, sería contraproducente tener en cuenta la compleja estructura de absorción selectiva que ostenta el vapor de agua en el infrarrojo. Basta con emplear un promedio aritmético, incluyendo tan sólo la dependencia del coeficiente efectivo de la presión (y por tanto de la altura), mas no de la temperatura (de la cual depende también, pero más débilmente). Haremos uso de la siguiente función (**Henschel**, 1956):

$$k_v(z) = k_v(0)e^{-\gamma z}, \quad (18)$$

donde $\gamma_k \approx 0.014$ km⁻¹ y

$$k_v(0) = \frac{1}{\lambda_M - \lambda_m} \sum_{i=1}^N k_i \Delta_i \lambda$$

(λ : longitud de onda). Para la determinación de este valor promedio remito a la tabla publicada por **Gónima** (1992). El promedio de los 65 valores que figuran en ella y que corresponden al espectro infrarrojo entre $5 = \lambda_m < \lambda < \lambda_M = 43$ μm resultó ser $k_v(0) = 6.26$ m²/kg.

La fórmula empírica de Ångström presupone una distribución de temperaturas sin inversiones, es decir, una disminución continua de la temperatura con la altura, como en nuestro perfil cuasi-lineal. La presión atmosférica decrece exponencialmente con la altura, y otro tanto podemos afirmar de nuestro perfil térmico, en vista de la relación (13). En cuanto al vapor de agua, como componente de la mezcla ideal que constituye el aire húmedo, se ha demostrado (**Dufour & van Mieghem**, 1975) que obedece a la ecuación de estado $p_v = p/R_v T = cp/R_a T$, siendo R_v y R_a las constantes del vapor de agua y del aire seco, respectivamente, y $\epsilon \approx 0.622$ el cociente R_v/R_a . Para representar la disminución de la presión del aire con la altura, es suficiente atenernos a su comportamiento en la atmósfera estándar, $p = p_0 e^{-\gamma_p z}$, $\gamma_p = 0.13$ km⁻¹. Recordemos además que, con arreglo a una definición esencial en el contexto de la ley de Dalton, se tiene la relación $p_v = p N_v$, y en particular, $\epsilon = p_v N_v$, siendo N_v la fracción molar del vapor de agua. Combinando esta información, obtenemos para el vapor de agua

$$\rho_v = \frac{\epsilon \epsilon}{N_v R_a T_s} e^{-(\gamma_p - \gamma) z},$$

o sea, una disminución exponencial con la altura. Por otro lado, los meteorólogos invariablemente favorecen la relación $\rho_v = \epsilon \epsilon / R_a T$, lo cual nos permite hacer caso de una distribución estándar del vapor de agua, basada en un promedio de muchas distribuciones observadas:

$$\rho_v = \frac{\epsilon \epsilon}{R_a T_s} e^{-\gamma_p z}, \quad (19)$$

con $\gamma_p = 0.44$ km⁻¹ (**Brutsaert**, 1982; valor citado también por **Gónima**, 1992). Privilegiaremos esta expresión empírica en lo que sigue, porque γ_p es tan solo un valor idéneo del perfil cuasi-lineal de temperatura (12), a saber, $\gamma_p = (16H_T)^{-1} = 0.025$ km⁻¹.

Insertando ahora en (17) la densidad del vapor de agua según (19) y el coeficiente de absorción según (18), la integración desemboca en la

siguiente expresión de la profundidad óptica del vapor de agua:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{vapor}} &\equiv \int_0^{H_T} \rho_v k_v dz \\ &= \frac{\epsilon k_v(0) \epsilon}{R_a T_s} \int_0^{H_T} e^{-(\gamma_p + \gamma) z} dz \\ &= \frac{\epsilon k_v(0) \epsilon}{R_a T_s (\gamma_k + \gamma_p)} [1 - e^{-(\gamma_p + \gamma) H_T}] \\ &\approx \frac{K \epsilon}{T_s}, \end{aligned} \quad (20)$$

donde se introdujo la abreviatura

$$K \equiv \frac{\epsilon k_v(0) \epsilon}{R_a (\gamma_k + \gamma_p)}. \quad (21)$$

Vemos que la profundidad óptica del vapor de agua es proporcional a su presión en superficie, e inversamente proporcional a la temperatura T_s de la misma, que es casi la misma que la del aire en superficie. En la práctica, se toman los valores de la temperatura y de la humedad relativa medidos en la garita meteorológica.

En definitiva, la profundidad óptica efectiva de nuestro modelo es la suma de dos contribuciones:

$$\tau_0^* = \tau_{\text{aer}}^* + \tau_{\text{vapor}}^* \quad (22)$$

una independiente del vapor de agua en la atmósfera (profundidad óptica del aire seco) y otra variable según la humedad relativa (profundidad óptica debida a la presencia del vapor de agua).

5. La irradiación infrarroja en superficie

Insertando el perfil de temperatura (12) en la integral del flujo descendente de radiación infrarroja incidente sobre la superficie, ec. (11), tenemos:

$$\begin{aligned} R^{\downarrow}(\tau_0^*) &= \sigma \int_0^{\tau_0^*} T^4(t) e^{-(\tau_0^* - t)} dt \\ &= R^{\downarrow}(\tau_0^*)_0 e^{-(\tau_0^* - \tau_0^*)} \\ &+ \sigma T_s^4 \frac{e^{-\tau_0^*}}{\gamma_k^{1/4}} \int_{\tau_0^*}^{\tau_0^*} t^{3/4} e^t dt, \end{aligned} \quad (23)$$

donde $R^{\downarrow}(\tau_0^*)_0$ representa el flujo infrarrojo descendente al nivel de la tropopausa. La integral del miembro derecho figura en tablas de integrales y se puede consultar, por ejemplo, en el atlas de funciones de **Spanier & Oldham** (1987), del cual

extraigo el siguiente resultado:

$$\int_0^x t^{\omega/4} e^t dt = \frac{x^{1+\omega/4}}{1+\omega/4} M(1+\omega/4; 2+\omega/4; x), \tag{24}$$

donde $M(1+\omega/4; 2+\omega/4; x)$ es la función de Kummer o función hipergeométrica ${}_1F_1(1+\omega/4; 2+\omega/4; x)$, igual a la unidad cuando el argumento x se anula. Para $\omega = 1$ obtenemos:

$$\frac{e^{-\tau_0^*}}{\tau_0^{*1/4}} \int_{\tau_0^*}^{\tau_0^*} t^{1/4} e^t dt = \frac{4}{5} \tau_0^{*5} e^{-\tau_0^*} M(5/4; 9/4; \tau_0^*) - \frac{4}{5} \frac{e^{-\tau_0^*}}{\tau_0^{*1/4}} \tau_0^{*5/4} M(5/4; 9/4; \tau_0^*). \tag{25}$$

La ecuación (23) se compone entonces de dos aportes. Un aporte estratosférico, disminuido por el término proporcional al segundo sumando de esta última ecuación,

$$R_2^1(\tau_0^*) = R^1(\tau_0^*) e^{-\tau_0^*} - \sigma T_a^4 \frac{4}{5} \frac{e^{-\tau_0^*}}{\tau_0^{*1/4}} \tau_0^{*5/4} M(5/4; 9/4; \tau_0^*), \tag{26}$$

aporte cuya magnitud es, como se demostrará en el apéndice A, despreciable frente a la contribución troposférica $R_{top}^1(\tau_0^*)$, la cual es proporcional al primer sumando de la ec. (25). Si la estratosfera es suficientemente transparente al flujo infrarrojo, podemos anular (26) eligiendo el valor $\tau_0^* = 0$, y la ecuación (23), expresada como $R^1(\tau_0^*) = R_{top}^1(\tau_0^*) + R_2^1(\tau_0^*)$, se reduce a:

$$r^1(\tau_0^*) = \frac{R_{top}^1(\tau_0^*)}{\sigma T_a^4} = \frac{4}{5} \tau_0^{*5} e^{-\tau_0^*} M(5/4; 9/4; \tau_0^*), \tag{27}$$

en donde se tuvieron en cuenta la definición (3) y la aproximación (15). En la Figura 2 se grafica el comportamiento de este flujo en función de la profundidad óptica infrarroja τ_0^* . Al mismo tiempo se exhibe la función $0.9(1 - 10^{-0.4\tau_0^*})$, una excelente aproximación a (27), si nos limitamos a valores de $\tau_0^* \lesssim 3$ (para $\tau_0^* \gtrsim 3$, la aproximación $0.97(1 - 10^{-0.35\tau_0^*})$ es globalmente mejor).

Queda patente que es posible reemplazar el contraflujo teórico (27) por la fórmula

$$r^1(\tau_0^*) \approx \alpha(1 - 10^{-\beta\tau_0^*}) \tag{28}$$

con parámetros α y β que no dependen sino débilmente de τ_0^* (α aumenta de 0.87 a 0.97 para $\tau_0^* \in (0.05, 10)$, manteniendo constante a $\beta = 0.4$), y

que por tanto se pueden considerar constantes en la práctica. Mediante un método variacional se podrían expresar los valores óptimos de estos dos parámetros en función de τ_0^* , pero debido a que la dependencia respecto de la profundidad es débil, no vale la pena detenernos en este aspecto accidental del problema.

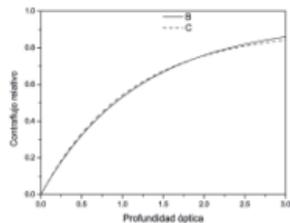


FIGURA 2. Contraflujo relativo (27) en función de τ_0^* (línea continua B) y su aproximación (28) (línea a trazos C).

Teniendo en cuenta la relación (22), esta última aproximación cobra ahora la forma

$$r^1(\tau_0^*) = \alpha(1 - 10^{-\beta\tau_0^*}) = \alpha - b_A 10^{-\beta\tau_0^*},$$

En la sección anterior se dedujo que la profundidad óptica del vapor de agua se puede expresar como $\tau_{vap} = K\epsilon/T_a$, donde ϵ designa su presión en superficie, de modo que nuestro proceder desemboca en una fórmula "de tipo Ångström": $r^1(\tau_0^*) = a_A - b_A 10^{-\gamma\epsilon}$, cuyos coeficientes son: $a_A = \alpha$, $b_A(\tau_{0,at}^*) = \alpha \times 10^{-\beta\tau_{0,at}^*}$ y $\gamma = \beta K/T_a$.

Si en la distribución troposférica (14) eligiéramos $\omega = 3/2$, se obtendría un perfil de temperaturas inferiores, con una tropopausa netamente más fría. En este caso la contribución troposférica a la irradiación en superficie se puede aproximar por una fórmula del mismo tipo, pero con otros coeficientes: $r^1(\tau_0^*) \approx 0.84(1 - 10^{-0.4\tau_0^*})$ ($\tau_0^* \lesssim 2$). Para $\omega = 2$, se tiene $r^1(\tau_0^*) \approx 0.79(1 - 10^{-0.4\tau_0^*})$ ($\tau_0^* \lesssim 2$). Para $\omega = 3$, a la contribución en cuestión resulta ser excelente la aproximación $r^1(\tau_0^*) \approx 0.75(1 - 10^{-0.35\tau_0^*})$ ($\tau_0^* \lesssim 2$), y para

$\omega = 5$, $r^1 \approx 0.68(1 - 10^{-0.3\tau_0^*})$ ($\tau_0^* \lesssim 2$). Da la impresión de que α (ω) es función decreciente de ω , así como β (ω) < 0.

Otra posibilidad de disminuir el coeficiente α es dar cuenta de la ventana espectral del vapor de agua, tal como se describe en el apéndice B, a raíz de lo cual los coeficientes a_A y b_A se acercan a los valores de la fórmula de Ångström, demostrándose así que su fórmula empírica puede explicarse mediante un modelo semigris modificado.

A la luz de estas consideraciones fugitivas se sigue que podemos adoptar la siguiente forma general para estimar la irradiación infrarroja relativa en superficie:

$$r^1(\tau_0^*) \approx a_A - b_A 10^{-\gamma\epsilon}, \tag{29}$$

con coeficientes (véase el apéndice B)

$$a_A = \alpha[1 - \beta_w(T_m)] \tag{30}$$

$$b_A = a_A \times 10^{-\beta\tau_{0,at}^*} \tag{31}$$

$$\gamma = \frac{\beta K}{T_a}. \tag{32}$$

Esta forma es idéntica a la propuesta por Ångström, quien de hecho también despreció el aporte estratosférico (ver apéndice A). Es evidente que $a_A \lesssim \alpha$. El modelo también permite determinar la influencia de la anchura relativa de la ventana espectral sobre este coeficiente en función de T_a y de τ_0^* , pero no hace falta extendernos sobre este aspecto. Puesto que $\beta_w < 0.3$ (apéndice B), $a_A > 0.7\alpha$, y queda así demostrado que los valores inferiores que Ångström y otros obtuvieron se deben a la presencia de la ventana en el espectro infrarrojo.

Adviértase que para una atmósfera seca ($\epsilon = 0$): $r^1(\tau_0^*) = a_A - b_A$; en el otro extremo está una atmósfera muy húmeda —con posible formación de nubes que podemos interpretar aquí como constituyendo un vapor muy espeso—, tenemos $r^1(\tau_0^*) = a_A \sim 0.75$ (con $\beta_w(260) = 0.22$), o sea que el 75% de la energía irradiada por un cuerpo negro a la temperatura del aire cabe la superficie es devuelto por una atmósfera muy húmeda, cuyo perfil corresponde a (12). El caso particular de una atmósfera pura y seca, desprovista de gases poliatómicos (los responsables del efecto invernadero) corresponde a $\tau_{0,at}^* = 0$, y entonces $r^1(\tau_0^*) = 0$, como era de esperar. Mediante el

contraflujo relativo (29), y con la condición de frontera (10), el flujo neto de radiación infrarroja en superficie (la "emisión efectiva" del suelo, como solía decirse antaño), reza:

$$R(\tau_0^*) = R^1(\tau_0^*) - R^1(\tau_0^*) = \epsilon_a \sigma T_a^4 (1 - a_A + b_A 10^{-\gamma\epsilon}).$$

Esta emisión efectiva es decisiva en la predicción de las heladas nocturnas y en la climatología de un lugar, aunque para ésta tendríamos que incluir la nubosidad. El mismo Ångström, y su colaborador Åshöf, pronto introdujeron un factor de corrección en función de la nubosidad n (en décimas), modificando la fórmula (1), válida solamente para una atmósfera con cielo raso. En la sección siguiente indicaremos cómo es posible añadir el factor de corrección dentro de nuestro marco teórico.

5.1. Radiación atmosférica con nubosidad.

Nuestro modelo permite incluir *grasso modo* la nubosidad. Comencemos por contemplar el caso de un tiempo completamente nublado, con una capa homogénea de nubes cuya temperatura uniforme sea T_c . Resolviendo la ecuación de transferencia (Sanderson & Chandrasekhar, 1950) para una temperatura constante, se desprende la siguiente emisividad de la capa nublada, en función de la profundidad óptica de la nube en régimen infrarrojo, τ_a :

$$\epsilon_c = 1 - 2E_3(\tau_a),$$

donde $E_3(\tau_a)$ es la integral exponencial de tercer orden (la forma aproximada $1 - e^{-3\tau_a/2}$ resulta de utilizar los flujos aproximados (7) y (8) y $\beta_c^T = 2/3$). Generalmente $\tau_a \gg 1$, y por consiguiente, $\epsilon_c \approx 1$; para nubes (ópticamente) muy delgadas habría que tener en cuenta su emisividad inferior a la unidad, pero el hecho de que en tal caso la capa de nubes sea translúcida (transalórica), complica la definición de las condiciones de contorno, que entonces incluyen aportes que dependen del estado térmico de toda la atmósfera e incluso, de nos ser $\epsilon_s = 1$, del albedo infrarrojo de superficie. Bástenos, pues, en este apartado, esbozar la solución en el caso de emisividades unitarias. Entonces podemos proceder de la siguiente manera para modificar la irradiación (29).

Para la atmósfera infranefélica (entre la superficie y la capa de nubes), podemos postular un

perfil de temperaturas semejante a (14):

$$T_l(\tau_l^*) = T_c + \left(\frac{T_s^* - T_c}{\tau_{nb}^*}\right)^{\varpi/16} (T_s^* - T_c),$$

en el cual el índice l nos recuerda que las variables se refieren a la capa infrarroja, cuya profundidad óptica es τ_{nb}^* .

$$R_l^{\downarrow}(\tau_{nb}^*) = \sigma T_c^4 e^{-\tau_{nb}^*} \left[1 + \tau_{nb}^* \sum_{k=0}^4 \binom{4}{k} \left(\frac{T_s^* - T_c}{1 + k\tau_{nb}^*}\right)^k M(1 + k\tau_{nb}^*, 2 + k\tau_{nb}^*) \right]$$

($\nu \equiv \varpi/16$). Para $T_c = 0$, $\varpi = 1$ y $\tau_{nb}^* = \tau_{nb}^*$, esta expresión se reduce a la expresión (27), reteniendo la relación (15). Para una capa infrarroja incapaz de absorber radiación térmica, $\tau_{nb}^* = 0$, y entonces se obtiene $R_l^{\downarrow}(\tau_{nb}^* = 0) = \sigma T_c^4$, la energía emitida por la capa de nubes.

Cuando la nubosidad n es una fracción entre 0 y 1, la irradiación de la superficie se calcula ponderando los dos flujos, el de una atmósfera con cielos nublados (Vardavas & Taylor, 2007):

$$R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; n) = R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 0)(1 - n) + R_l^{\downarrow}(\tau_{nb}^*)n$$

siendo ahora $R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 0)$ la expresión (23). Con las mismas aproximaciones efectuadas en el apartado anterior, obtenemos la corrección deseada:

$$R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; n) = R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 0)(1 + \kappa_{\rho} n) \quad (33)$$

donde

$$\kappa_{\rho} \equiv \frac{R_l^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 1)}{R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 0)} - 1 \quad (34)$$

y $R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 1) = R_l^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 1)$; κ_{ρ} es un factor nefélico que varía con la altura de las nubes (a través de τ_{nb}^* , T_c), y en la práctica también con el tipo de nubes.

Nuestro resultado (33) se inscribe en la categoría de fórmulas empíricas que se pueden resumir en la expresión

$$R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; n) = R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 0)(1 + an^b)$$

(Brutsaert, 1982). Las fórmulas originales requieren $b = 1$, pero hay quien (Bolz, 1949) obtuvo un valor próximo a $b = 2.5$ (recomendando como suficiente el de $b = 2$). El mismo Bolz indica

Pasando a calcular el flujo descendente (8), bajo la nueva condición de contorno $R_l^{\downarrow}(0) = \sigma T_c^4$, tenemos que la superficie es inundada por un contraflujo infrarrojo procedente tanto de las nubes como de la capa infrarroja:

que $a \in (0.04, 0.25)$, calculando un valor promedio de $a = 0.22$, sobre la base de datos recogidos al borde del mar Báltico. Con emisividades no unitarias, se concibe que nuestro modelo proporciona un término cuadrático en ν , pero elegamos una derivación de este caso más general a un trabajo futuro.

5.2. Ejemplo numérico. A modo de ilustración, calcularemos algunos valores de los coeficientes de la fórmula de Ångström, partiendo de $r^{\downarrow}(\tau_{nb}^*) \approx \alpha(1 - 10^{-\beta\tau_{nb}^*})$ con $\alpha = 0.97$ y $\beta = 0.33$, la fórmula electa para valores de $\tau_{nb}^* \leq 10$. Sean también $T_s = 288$ K, $T_c = 270$ K, y $\tau_{nb}^* = 1.2$ (o sea, con $\bar{\mu}^{\downarrow} = 0.6$, $\tau_{nb}^* = 1.2 \times \bar{\mu}^{\downarrow} = 0.72$). Para la medida de la ventana espectral tenemos entonces $\beta_w(T_w) = 0.22$ (apéndice B).

En cuanto a K , usaremos los valores espectrales del coeficiente de absorción del vapor de agua publicados por Gónima (1992), que abarcan las longitudes de onda entre 5.25 μm y 71.64 μm . Si promediamos solamente entre 5.25 μm y 25 μm , que correspondería al intervalo que Ångström podía captar con sus aparatos, entonces $K = 8$; si empleamos todos los valores, $k_w(0) = 20.75$ m²/kg y por tanto $K = 98.5$, y si promediamos sin el último valor que figura en la tabla, $\lambda = 71.64$ (banda de fortísima absorción), se tiene $k_w(0) = 6.26$ m²/kg y $K = 29.9$, nuestro valor predilecto de ahora en adelante.

Obtenemos entonces los siguientes coeficientes: $a_A = 0.76$, $b_A = 0.30$, $\gamma = 0.034$ ($\gamma = 0.136$

si se toma el valor $K = 98.5$); los coeficientes de Ångström citados en Kondratyev (1969, p. 571) varían entre los siguientes límites: $a_A \sim 0.75 - 0.85$, $b_A \sim 0.17 - 0.32$, $\gamma \sim 0.055 - 0.126$. Este último valor depende en el modelo de la temperatura de la superficie y, por lo tanto, habría que mencionarla al citarse valores de γ .

En cuanto al aumento de irradiación en presencia de nubes (con la ventana espectral cerrada, es decir, $\beta_w = 0$), un ejemplo escogido al azar ilumina el sentido de la modificación. Dadas las temperaturas $T_s = 288$ K, $T_c = 270$ K (nubes bajas) y un 60% de nubosidad, calculamos mediante (34) un valor de κ_{ρ} igual a 0.2, mientras que de (33) resultan los flujos $R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 0) = 295.43$ W/m² y $R^{\downarrow}(\tau_{nb}^*; 0.6) = 330.96$ W/m².

5.3. Apostilla a la fórmula de Brunt. Pensando en Raman (1935), cabe preguntarnos hasta qué punto es posible aproximar la fórmula empírica de Ångström por la de Brunt, ec. (2). Una aproximación burda, pero aceptable en la práctica resulta ser la siguiente (véase la Figura 3). Para demostrar la maleabilidad del modelo, partimos de (28) con $\alpha = 0.9$ y $\beta = 0.4$ (que se ajusta mejor en el intervalo $\tau_{nb}^* \leq 3$), y calculamos los siguientes valores, sin tener en cuenta la ventana atmosférica ($\beta_w = 0$): $a_A = 0.9$, $b_A = 0.64$ (atmósfera seca menos absorbidora o "contaminada", de profundidad óptica igual a $\tau_{nb}^* = 0.5$), $\gamma = 0.042$. Para la fracción de σT_c^4 que incide en superficie tenemos entonces:

$$r^{\downarrow}(\tau_{nb}^*) = a_A - b_A 10^{-\gamma \tau_{nb}^*} = a_B + b_B \sqrt{e}$$

donde

$$a_B = a_A - b_A = 0.26$$

$$b_B = 0.12$$

Los valores medios que uno encuentra, $a_B = 0.44$ y $b_B = 0.08$, representan el promedio de distintas series de observaciones (Brunt, 1934), pero las "constantes" parecen oscilar entre amplios límites (Raman, 1935; Sellers, 1965): $a_B \in (0.26, 0.71)$, $b_B \in (0.023, 0.12)$. La serie de observaciones realizadas durante un año en Poona, India, a una elevación de 564 m, arrojó los valores $a_B = 0.26$ y $b_B = 0.12$, con un coeficiente de correlación igual a 0.93 (Raman, 1935). La coincidencia entre estos últimos valores y los nuestros, calculados, aunque sin duda fortuita, autoriza a pensar que la teoría

elemental desarrollada aquí compagina con datos observados.

Los valores medios que uno encuentra, $a_B = 0.44$ y $b_B = 0.08$, representan el promedio de distintas series de observaciones (Brunt, 1934), pero las "constantes" parecen oscilar entre amplios límites (Raman, 1935; Sellers, 1965): $a_B \in (0.26, 0.71)$, $b_B \in (0.023, 0.12)$

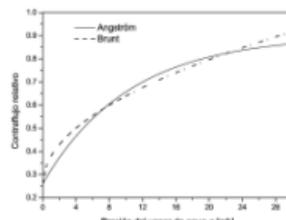


FIGURA 3. Aproximación del contraflujo relativo según la fórmula de Ångström mediante una curva del tipo (2), según Brunt.

6. Conclusiones

El marco presentado en este ensayo, sobre la base de un modelo bipotómico de innegable simplicidad conceptual, es más que holgado para la meta que nos propusimos, aunque, claro está, no satisfará al especialista atento a los detalles del intercambio de energía por radiación, como se tienen en cuenta en los modelos contemporáneos de la transferencia radiativa.

El reparo más serio que se puede alegar concierne el hecho de que el trueque inospechado de una función analítica, fruto de una integración exacta, por la fórmula empírica de Ångström, aunque rinda honor a la aguda intuición que éste ostentaba a la hora de proponer sus fórmulas empíricas, no es una deducción rigurosa irrecusable. Los coeficientes que surgen de

la acomodación de una función a otra dependen del intervalo de profundidades ópticas, y de los parámetros de un perfil de temperatura cuasi-realista, además de depender de la emisividad del suelo, que puede llegar a ser un 10% inferior a la unidad para suelos arenosos. Cabe señalar que una disminución de ϵ_s implica un aumento del coeficiente α .

El presente modelo biotérmico de radiación capta los rasgos esenciales del problema planteado, dando pie a la justificación teórica de la fórmula empírica de Ångström. No está basado en el perfil realmente observado, sino en una aproximación oportuna al perfil lineal de la atmósfera estándar (base de los altímetros empleados en aeronaves con barómetros aneroides), permitiendo así calcular sin mayor óbice los dos flujos de radiación infrarroja que se propagan verticalmente en la atmósfera.

En virtud de dos sencillas modificaciones, se logró tener en cuenta una capa de nubes con nubosidad variable, al igual que la consabida "ventana" atmosférica entre 8 y 12 μm , intervalo espectral en el cual el vapor no emite radiación hacia el suelo, siendo transparente a la radiación infrarroja, mientras que nuestro modelo estrictamente semigris, la emisión incluye dichas longitudes de onda. La ventana se introdujo para compensar esta radiación excedente y así se equilibra el expediente de imaginar una temperatura atmosférica más fría que la real ($\varpi > 1$), cuyo efecto es disminuir el coeficiente α_A en el sentido deseado; con la inclusión de la ventana atmosférica se generan valores de los coeficientes α_A y β_A más acordes con los que suelen citarse. Si la atmósfera está muy húmeda y da lugar a nubes, la ventana se tapa (se "cierra la cortina", por así decirlo), y entonces la emisión del agua (en forma de vapor o en estado condensado) es relativamente continua, y el reparo al carácter gris del modelo original es menos virulento. A pesar de no ser enteramente rigurosa muestra "deducción" de la fórmula de Ångström, no podemos menos que considerarla acertada. Con el modelo actual es posible interpretar las "constantes" de la fórmula empírica de Ångström, y convenceremos de que las mismas varían según la localidad, mientras que en otras fórmulas empíricas los coeficientes de regresión no parecen apoyarse en un fundamento teórico

nítido. La expresión explícita de β_A , por ejemplo, permite estimar la profundidad óptica de la atmósfera seca, y su variabilidad refleja el grado de contaminación atmosférica. En este trabajo no se aplica la teoría a un caso y lugar concretos con datos actuales, pero se abordará la labor de llevar a sus últimas consecuencias en un proyecto futuro. Mientras tanto, si algún investigador, con los datos necesarios a su alcance, siente el prurito de verificar el contenido teórico de la fórmula, tanto mejor.

Agradecimientos

Este trabajo se elaboró expresamente en homenaje a la obra y vida del difunto miembro de número de la Academia, Jesús Antonio Elava Ramírez, climatólogo y meteorólogo de primera hora de la Universidad Nacional de Colombia, quien con maña incomparable supo gerenciar no solamente proyectos meteorológicos de gran aliento, sino fomentar trabajos individuales que no siempre encajaban en ellos, como le consta al autor de este ensayo.

Referencias

- Anduekía, J. C. y J. Pelkowski, 2009. Algunos resultados de equilibrio radiativo en atmósferas con nubes. *Meteorología Colombiana*, No. 2, 23-31.
- Ångström, A., 1915: A Study of the Radiation of the Atmosphere. *Smithsonian Miscellaneous Collections* 65, No. 3. City of Washington.
- Ångström, A., 1916: Über die Gegenstrahlung in der Atmosphäre. *Meteor. Zeit.* 33, 529-538.
- Bolz, H.M., 1949: Die Abhängigkeit der infraroten Strahlung von der Bewölkung. *Z. Meteorol.* 3, 201-203.
- Bruno, D., 1932: Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 58, 389-420.
- Brutsaert, W., 1982: Evaporation into the Atmosphere. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Chandrasekhar, S., 1950: Radiative Transfer. Clarendon Press, Oxford.
- Dufour, L. y J. van Mieghem, 1975: Thermodynamique de l'atmosphère. Institut Royal Meteorologique de Belgique, J. Duclos, Gembloux, Belgique.
- Eisner, W. M., 1942: Heat Transfer by Infrared Radiation in the Atmosphere. *Harvard Meteorological Studies No. 6*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Emden, R., 1913: Über Strahlungsgleichgewicht und atmosphärische Strahlung. *Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Math-Phys. Klasse*, 55-142.

- Gónima, L., 1992: Validation of a radiation model for estimation of longwave net radiation at the surface. *Clim. Res.* 2, 55-63.
- Goody, R. y Y.L. Yung, 1989: Atmospheric Radiation. Theoretical Basis. Oxford University Press, Nueva York.
- Henschel, K., 1956: Theoretische Betrachtungen über empirische Formeln der Gegenstrahlung. *Z. Meteorol.* 10, 302-308.
- Kondratyev, K. Ya., 1969: Radiation in the Atmosphere. Academic Press, London y Nueva York.
- Pekeris, C. L., 1934: Note on Brunt's formula for nocturnal radiation of the atmosphere. *Astrophys. J.* 79, 441-447.
- Pelkowski, J., 1993: Approximating the source function of an atmosphere in radiative equilibrium: A variational method. *Zeit. Phys.* 466, 259-271.
- Pelkowski, J., 1994: Towards an accurate estimate of the entropy production due to radiative processes: Results with a gray atmosphere model. *Meteorol. Atmos. Phys.* 53, 1-17.
- Pelkowski, J., 2007: El albedo terrestre. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 31 (121), 53-74.
- Pelkowski, J., L. Chevallier, B. Rutly, and O. Titus, 2008: Exact results in modeling planetary atmospheres—III. The general theory applied to the Earth's semi-gray atmosphere. *J. Quant. Spectr. Rad. Transf.* 109, 43-51.
- Pelkowski, J., 2009: A physical rationale for generalized Ångström-Preusselt regression. *Solar Energy* 83, 950-963.
- Pujol, T. y G.R. North, 2002: Runaway greenhouse effect in a semigray radiative-convective model. *J. Atmos. Sci.* 59, 2801-2810.
- Raman, P. K., 1935: Derivation of Ångström's formula for atmospheric radiation and some general considerations regarding spectral cooling of air-layers near the ground. *Proc. Ind. Acad. Sci.* 1, 822-829.
- Sellers, W.D., 1965: Physical Climatology. The University of Chicago Press, Chicago.
- Spanier, J. y K.B. Oldham, 1987: An Atlas of Functions. Hemisphere Publishing Corporation, Springer-Verlag, Berlin.
- Vardavas, I.M. y F.W. Taylor, 2007: Radiation and Climate. Oxford University Press, Oxford.

Recibido el 19 de julio de 2009

Aceptado para su publicación el 20 de diciembre de 2009

Apéndice A: El aporte estratosférico

De la ecuación (23) se sigue que la contribución estratosférica a la irradiación infrarroja en superficie viene expresada por $R^i(\tau_{tr}^*)e^{-(\tau_{tr}^* - \tau_s^*)}$, ligeramente disminuida por el término

$$\sigma T_{tr}^4 \frac{e^{-\tau_s^*}}{\tau_{tr}^* - 1} \int_{\tau_s^*}^{\tau_{tr}^*} t^{1/4} e^t dt \approx \sigma T_{tr}^4 \alpha (1 - 10^{-0.6\tau_s^*}) e^{-(\tau_s^* - \tau_{tr}^*)}$$

El flujo proveniente de una estratosfera en equilibrio radiativo, al nivel de la tropopausa, se puede expresar como

$$R^i(\tau_{tr}^*) = R^i(\tau_{tr}^*) - R^i(0),$$

suponiendo que no incide radiación de onda larga en el tope de la estratosfera ($R^i(\tau_{tr}^*) = 0$ para $\tau_{tr}^* = 0$), donde reina una presión atmosférica aproximadamente igual a una milésima de la presión atmosférica en superficie. Mediante la transmisividad infrarroja de la estratosfera, que se define como

$$\bar{\tau}_{str} = \frac{R^i(0)}{R^i(\tau_{tr}^*)},$$

y la de la troposfera,

$$\bar{\tau}_{tr} = \frac{R^i(\tau_{tr}^*)}{R^i(\tau_s^*)}$$

el flujo descendente al nivel de la tropopausa asume la forma

$$R^i(\tau_s^*) = R^i(\tau_s^*) \bar{\tau}_{tr} (1 - \bar{\tau}_{str}),$$

y la ecuación (26) se convierte en la expresión:

$$R^i(\tau_s^*) = R^i(\tau_s^*) [\bar{\tau}_{tr} (1 - \bar{\tau}_{str}) - \left(\frac{T_{tr}}{T_s}\right)^4 \alpha (1 - 10^{-0.6\tau_s^*})] e^{-(\tau_s^* - \tau_{tr}^*)}$$

Hemos elegido en la ec. (10), para no alargar innecesariamente este apéndice, una emisividad superficial igual a la unidad ($\epsilon_s = 1$), un valor que no dista mucho de las emisividades normalmente encontradas en la naturaleza (para la arena sería conveniente elegir un valor menor).

La transmisividad de una estratosfera en equilibrio radiativo local se puede obtener sobre la base de la solución (16). En uno de los posibles métodos para determinar los coeficientes a y b (a saber: solución de una ecuación integral aproximada, trabajo inédito en curso de publicación), se obtiene $a = 0.5$ y $b = a/\bar{\mu}^+$, además de

$$\bar{\epsilon}_{str} = \frac{2}{2 + \tau_{tr}^*}$$

La transmisividad troposférica, $\bar{\epsilon}_{tr} = R^1(\tau_{tr}^*)/R^1(\tau_{tr}^*)$ se calcula a partir de (7). Con el perfil cuasi-lineal y el resultado

$$\int_0^x t^{1/4} e^{-t} dt = x^{1/4} e^{-x} M(1; 5/4; x) - 1]$$

(Spanier & Oldham, 1987), se obtiene:

$$\bar{\epsilon}_{tr} = e^{-(\tau_{tr}^* - \tau_{tr}^0)} M(1; 5/4; \tau_{tr}^*) - \left(\frac{\tau_{tr}^*}{\tau_{tr}^0}\right)^{1/4} [M(1; 5/4; \tau_{tr}^*) - 1].$$

Es evidente que $\bar{\epsilon}_{tr}$ depende de τ_{tr}^* , o sea, del vapor de agua en la troposfera. $R_2^1(\tau_{tr}^* = 3) = 0.052$ Wm^{-2} ($T_s = 288$ K, $\tau_{tr}^* = 0.0316$), $R_2^1(\tau_{tr}^* = 1.2) = -0.184943$ Wm^{-2} ($T_s = 288$ K, $\tau_{tr}^* = 0.1$); $R_2^1(\tau_{tr}^* = 1.2) = -2.24375$ Wm^{-2} ($T_s = 288$ K, $\tau_{tr}^* = 0.2$). Vemos que podemos despreciar el aporte (26), corroborando como excelente la aproximación (29) para la irradiación infrarroja relativa al nivel del suelo.

Apéndice B: La ventana del vapor de agua

En un afán de armonizar el valor de a con valores de a_A que uno encuentra en la literatura, siendo éstos cerca de un 20% menores que aquí, vamos a delinear en este apéndice una modificación llana del modelo actual, reemplazando el supuesto de un solo coeficiente de absorción en el infrarrojo (modelo semigris) por el de dos coeficientes con valores medios generalmente distintos (modelo semigris extendido). La posibilidad más inmediata de reducir la radiación devuelta por la atmósfera húmeda es tener en cuenta el hecho de que el vapor de agua no absorbe radiación infrarroja sino débilmente (espectro continuo de absorción) en el intervalo de ondas que corresponde a lo que se conoce como la ventana atmosférica (de 8 a 12 μm). Con tal fin, introducimos un coeficiente de absorción k_w que consta de dos valores, uno válido en el intervalo de dicha ventana (k_w) y el otro igual al valor que hemos venido usando (k_w), correspondiente al complemento infrarrojo de ese intervalo (el espectro infrarrojo se define para longitudes de onda λ tal que $\lambda > \lambda_c = 4 \mu\text{m}$):

$$k_w(\lambda) = k_w[H(\lambda - \lambda_c) + (\epsilon_w - 1)(H(\lambda - \lambda_1) - H(\lambda - \lambda_2))]. \quad (35)$$

En esta expresión se utilizó la función escalón (o de Heaviside), $H(\lambda - \lambda_c)$, igual a la unidad para valores $\lambda > \lambda_c$, e igual a cero para $\lambda < \lambda_c$. Con el cociente $\epsilon_w = k_w/k_w$ podemos graduar el aporte de la ventana al flujo de radiación. $\epsilon_w = 0$ si la ventana es absolutamente transparente (ventana limpia), mientras que $\epsilon_w = 1$ corresponde a nuestro caso semigris anterior (ventana sucia o cubierta).

La irradiancia (11) varía generalmente con la longitud de onda (por medio del irregular coeficiente de absorción en el integrando de la profundidad óptica y, más suavemente, a través de la función de Planck πB_{λ_1} , cuya integración con respecto a λ lleva a la ley de Stefan-Boltzmann, σT^4). La expresión del flujo monocromático descendente es:

$$R^1(\tau_{\Delta}^*) = \pi \int_0^{\tau_{\Delta}^*} e^{-(\tau_{\Delta}^* - \tau)^1} B_{\lambda}(\tau) d\tau. \quad (36)$$

El flujo holocromático $R^1(\tau_{\Delta}^*)$ resulta de la integración espectral, $R^1(\tau_{\Delta}^*) = \int_0^{\infty} R^1(\tau_{\Delta}^*) d\lambda$. En el caso semigris original, la integración produce directamente la forma (11), pero en el caso presente se obtiene, en virtud de (35), un flujo que consta de dos partes:

$$R^1(\tau_{\Delta}^*) = \sigma \int_0^{\tau_{\Delta}^*} e^{-(\tau_{\Delta}^* - \tau)^1} (1 - \beta_w) T^4 d\tau + \sigma \int_0^{\tau_{\Delta}^*} e^{-(\tau_{\Delta}^* - \tau)^1} \beta_w T^4 d\tau,$$

donde la función

$$\beta_w(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} B_{\lambda} d\lambda} = \frac{\pi}{\sigma T^4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_{\lambda} d\lambda,$$

es una medida de la anchura de la ventana espectral, y donde ahora

$$\tau_{\Delta}^* = \int_0^H k_w \rho dz$$

es la profundidad óptica infrarroja omitiendo la ventana espectral, mientras que a la atmósfera dentro de ésta corresponde la profundidad óptica $\tau_{\Delta}^* = \epsilon_w \tau_{\Delta}^*$, generalmente menor que τ_{Δ}^* .² La función $\beta_w(T)$ puede aproximarse gracias a un polinomio cúbico de la temperatura (Pujol & North, 2002): $\beta_w(T) \approx \sum_{j=0}^3 d_j T^j$, con coeficientes $d_0 = -0.737774$, $d_1 = 0.00670592$ K^{-1} , $d_2 = -1.39486 \times 10^{-5}$ K^{-2} , $d_3 = 9.02909 \times 10^{-9}$ K^{-3} (aquellos autores suprimieron por descuido el signo menos de d_2).

La contribución de la ventana al flujo $R^1(\tau_{\Delta}^*)$ no es apreciable cuando $\epsilon_w \ll 1$, y en una primera aproximación es justo suponer una ventana limpia, de modo que $\epsilon_w = 0$ (y por ende $\tau_{\Delta}^* = 0$). Por consiguiente, el flujo anterior se reduce a:

$$R^1(\tau_{\Delta}^*) = \sigma \int_0^{\tau_{\Delta}^*} e^{-(\tau_{\Delta}^* - \tau)^1} [1 - \beta_w(T)] T^4 d\tau.$$

Para no demorarnos integrando esta expresión con nuestro perfil cuasi-lineal, integración que no ofrece mayor problema si recordamos el resultado (24), seleccionemos un valor intermedio apropiado del peso $(1 - \beta_w)$ tal que:

$$R^1(\tau_{\Delta}^*) = \sigma [1 - \beta_w(T_m)] \int_0^{\tau_{\Delta}^*} e^{-(\tau_{\Delta}^* - \tau)^1} T^4 d\tau.$$

Con esta modificación al flujo (23), nuestra aproximación original (28) queda modificada por el factor $[1 - \beta_w(T_m)]$, y así se obtienen los coeficientes modificados a_A y b_A consignados en las ecs. (30) y (31). β_w varía entre $\beta_w(200) = 0.1177$ y $\beta_w(330) = 0.28$ para temperaturas troposféricas.

Podemos permitir estas reflexiones afirmando que la introducción de la ventana atmosférica debajo del vapor de agua permite reducir el coeficiente a en nuestro ajuste (28), explicando así los valores inferiores de los coeficientes de Ångström que se suelen estimar en la regresión de las mediciones de $R^1(\tau_{\Delta}^*)$.

²Para simplificar una vez más, estoy empleando el mismo coseno director μ^2 en ambas partes del espectro, pero mejor sería introducir $\tau_{\Delta}^* = \epsilon_w \tau_{\Delta}^* \mu^2 / \mu_w^2$, con un coseno director μ_w^2 menor en la ventana, puesto que en ella la atmósfera es "panda", es decir, más transparente.

EVALUACIÓN DE CALIDAD POR ESPECTROSCOPIA RAMAN Y MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA DE PELÍCULAS DE DIAMANTE CRECIDAS POR HOT FILAMENT-CVD

Por

Wayner Rivera¹, Alfonso Devia² & José Pérez³

Resumen

Rivera W. , A. Devia & J. Pérez: Evaluación de calidad por espectroscopía Raman y microscopía de fuerza atómica de películas de diamante crecidas por hot filament-CVD. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **33** (129): 529-538, 2009. ISSN 0370-3908.

En este trabajo se reporta el crecimiento de películas de diamante depositadas sobre silicio cristalino (111) por la técnica de HFCVD. La espectroscopía Raman permite evaluar la progresiva degradación de la calidad de las películas por el efecto combinado del aumento de la concentración de metano y la disminución de la temperatura del sustrato. Las películas de mejor calidad presentan un pico Raman agudo y estrecho con un FWHM de 8.07 cm^{-1} , coincidente en su posición en 1332 cm^{-1} con el pico del diamante natural. La caracterización por AFM permite establecer criterios finos de calidad de las películas en función del tamaño de los granos y de la rugosidad de la superficie. El análisis por AFM de películas crecidas en iguales condiciones termodinámicas revela diferencias significativas de morfología. Las películas de diamante depositadas por HFCVD parecen reproducibles si se aplican los criterios de calidad de la espectroscopía Raman pero presentan diferencias significativas en la escala de resolución del AFM.

Palabras clave: diamante, deposición en fase de vapor (CVD), espectroscopía Raman, morfología de superficies, granos cristalinos, microscopía de fuerza atómica (AFM).

Abstract

This paper reports the growth of diamond film deposited on crystalline silicon (111) through the HFCVD technique. Raman spectroscopy allows evaluating progressive degradation of the

¹ Departamento de Física, Universidad del Cauca, Popayán - Colombia. Dirección: Calle 5 # 4-70. Popayán. Correo electrónico: wrivera@unicauca.edu.co

² Laboratorio de Física del Plasma, Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, Manizales - Colombia

³ Department of Physics, University of North Texas, Denton- Texas, USA

quality of the films due to the combined effect of methane concentration and the decrease in substrate temperature. The best quality films show an acute and narrow Raman peak with a FWHM of 8.07 cm^{-1} , coincident in its 1332 cm^{-1} position to the peak of natural diamond. Characterization through AFM allows establishing fine quality criteria of the film according to the grain size and the roughness of the surface. AFM analysis of films grown in equal thermodynamic conditions reveals significant morphological differences. Diamond films deposited by HFCVD seem reproducible if Raman spectroscopy criteria are applied but present significant differences in the AFM resolution scale.

Key words: diamond, chemical vapor deposition (CVD), Raman spectroscopy, surface morphology, crystalline grains, Atomic Force Microscopy (AFM).

Introducción

La primera síntesis de diamante en el laboratorio, por el método de alta presión y alta temperatura, acrecentó el interés científico y tecnológico por este material (**Bundy F.P. et al.**, 1955). Varios años después se conoció el primer reporte de producción de películas heteroepitaxiales con contenido de enlaces de carbono tipo diamante por el método de Chemical Vapor Deposition (CVD) (**Deryagin B.V. et al.**, 1976). Las extraordinarias propiedades del diamante y las amplias perspectivas de su utilidad en diferentes campos de la industria han motivado en los últimos años innumerables trabajos de investigación dedicados a la síntesis y crecimiento de películas de diamante de alta calidad a bajo costo. Estos esfuerzos han permitido avanzar en el conocimiento de diferentes métodos y técnicas, entre los que se destacan los procesos a baja presión como el Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) y el Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (MWPECVD), al igual que el método de ablación laser (**May P.W.** 2000, **Proffitt S.S. et al.**, 1999, **Yoshitake T. et al.**, 2003).

El diamante de alta calidad sintetizado en el laboratorio tiene las mismas características del diamante natural. La excepcional dureza y la alta resistencia al desgaste mecánico de este material, en combinación con su baja reactividad química, hacen recomendable su uso como capa protectora de herramientas para disminuir la abrasión o el desgaste y evitar la corrosión; el diamante también es un excelente material semiconductor con alta conductividad térmica apto para la fabricación de dispositivos electrónicos activos y pasivos (**May P.W.**, 2000). Sin embargo, a diferencia del diamante natural o de los cristales de diamante sintetizados por el método de alta presión y alta temperatura, las películas heteroepitaxiales de diamante depositadas a baja presión son policristalinas con relativamente alta concentración de impurezas y defectos cristalinos que degradan la calidad de las propiedades ópticas y electrónicas del material.

La caracterización de la estructura cristalina, de la composición química y de la morfología de la superficie de las películas de diamante a nivel microscópico, o mejor aún nanoscópico, es muy importante para entender los mecanismos de crecimiento y la calidad de las películas en función de sus potenciales aplicaciones. Numerosas investigaciones se han adelantado con el objetivo de producir películas de diamante con alto nivel de calidad y reproducibilidad; en especial se han dedicado esfuerzos a la producción de películas de alta pureza con morfología y tamaño de grano altamente reproducibles y con características acordes al tipo de aplicación (**Hassan I.U. et al.**, 1999, **Ye H. et al.**, 2000, **Sun F.H. et al.**, 2006).

La espectroscopía Raman es una poderosa herramienta para caracterizar materiales basada en las interacciones fotón-fonón de las vibraciones de la red (**Pollak F.H., Tsu R.**, 1983). Puesto que estas interacciones son muy sensitivas al microambiente local, los espectros Raman dan información sobre la estructura y calidad del material en la escala de unas pocas constantes de la red cristalina. En particular se puede obtener información sobre la estructura y la composición del material cuando coexisten diferentes formaciones cristalinas y se puede medir también el grado de desorden composicional. Los picos agudos en el espectro Raman se deben a la presencia de material de alta calidad cristalina en los cuales la actividad Raman se presenta como un efecto de primer orden por la interacción de un fonón óptico en condiciones de conservación del momento del fonón para un vector de onda nulo. La asimetría de estos picos y su ensanchamiento se debe a efectos de segundo orden donde la dispersión Raman tiene efecto con la participación de dos fonones. De esta forma la medida del ensanchamiento del pico permite determinar la competencia entre diferentes composiciones en el material o estimar el nivel de material amorfo presente en la muestra.

Para evaluar las propiedades de textura de la superficie y de la geometría de los granos que constituyen la película se deben utilizar herramientas de alta resolución espacial.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) suele ser la herramienta más común para caracterizar la morfología y la geometría de la superficie de las películas de diamante sintético. Sin embargo, el SEM tiene limitaciones de resolución y no permite evaluar apropiadamente los valores de rugosidad y tamaño de los granos, y menos aún la altura o el volumen de los mismos. Para evaluar las mencionadas características se debe recurrir a un microscopio de sonda de barrido (SPM) que explora las propiedades geométricas en tres dimensiones en la escala de los nanómetros. En el caso de las películas de diamante cuyo comportamiento eléctrico es el de un aislante resulta apropiado un sistema SPM como el microscopio de fuerza atómica (AFM) que puede explorar superficies no conductoras. En estudios previos el AFM ha sido utilizado para estudiar la morfología de las películas de diamante con alta resolución para determinar en escala de alta resolución la textura y las orientaciones cristalinas de los granos (Fan Y. *et al.* 2000); en este artículo se presenta un estudio detallado con resolución en la escala de los nanómetros de las dimensiones de los granos y la rugosidad de este tipo de películas.

En este trabajo se reporta el crecimiento de películas de diamante depositadas sobre silicio cristalino (111) por la técnica de HFCVD usando una mezcla de gases con concentraciones variables de metano (CH_4) en hidrógeno (H_2). Por medio de espectroscopia Raman se estableció que las películas de mayor calidad y pureza se formaron con una temperatura de sustrato (T_s) de 850°C y con una concentración de metano (C_{CH_4}) del 0.5% en H_2 . Estas películas presentan un pico Raman agudo y estrecho coincidente en su posición en 1332 cm^{-1} con el pico del diamante natural. Las películas decrecen en calidad en la medida que se aumenta la concentración de metano y se disminuye la temperatura del sustrato hasta obtener películas de muy baja calidad constituidas principalmente por grafito desordenado o policristalino, caracterizado por la presencia de un pico ensanchado en 1580 cm^{-1} , cuando se trabaja con una T_s de 750°C y una C_{CH_4} de 1.5%. El valor mínimo registrado en este trabajo del full width at half maximum (FWHM) del pico Raman en 1332 cm^{-1} de 8.07 cm^{-1} correspondiente a la película de mejor calidad es superior al valor de referencia de 4.58 cm^{-1} del diamante natural. Las medidas por AFM de las propiedades topográficas y morfológicas de las películas muestran que existen diferencias apreciables de textura, tamaño de grano y rugosidad aún entre películas crecidas por HFCVD en condiciones termodinámicas idénticas.

Métodos experimentales

Las películas de diamante se depositaron sobre sustratos de silicio cristalino de orientación (111) por me-

dio de un sistema de filamento caliente en una cámara de CVD, similar al descrito por May P.W. 2000. Previo al recubrimiento de los sustratos (de 1 cm^2 de área) estos se rayaron con polvo de diamante de $1\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro, con el propósito de aumentar la densidad de sitios de nucleación (Venables J.D. *et al.*, 1990), y se sometieron a una limpieza con alcohol etílico en ultrasonido. Antes de iniciar el proceso de deposición de cada película la cámara de vacío se evacuó hasta alcanzar una presión de 200 mtorr y enseguida se purgó con nitrógeno por 2 minutos. A continuación se inyectó una mezcla de hidrógeno y metano y la presión se estabilizó en 30 mtorr. El flujo de hidrógeno se mantuvo constante en 200 sccm mientras que el flujo de metano se reguló en 1, 2 y 3 sccm para depositar películas con tres diferentes concentraciones. El sustrato de silicio se colocó cerca de un alambre de tungsteno, a alta temperatura, el cual origina el plasma que da lugar a la formación de las películas a base de carbono, y después de 12 horas de reacción de la mezcla de gases sobre el sustrato se obtienen recubrimientos de $2\text{ }\mu\text{m}$ de espesor. El sustrato se calentó a una temperatura entre 750°C y 850°C por medio de una fuente eléctrica AC, marca Power Stat Type 116 – PH 1, con una salida de voltaje de 0-140 V y una corriente máxima de 7.5 A. Este sustrato se colocó a 5 mm del filamento de tungsteno de 0.005 pulgadas de diámetro cuya temperatura se eleva a 2200°C por medio de una fuente eléctrica AC, marca Variac con una salida de voltaje de 0-100 V y una corriente máxima de 30 A. La temperatura del sustrato de silicio y la del alambre de tungsteno se determinó por medio de un pirómetro óptico de Micro-Therm.

Las películas se retiraron de la cámara para ser estudiadas con un sistema Raman y un microscopio de fuerza atómica AFM. El sistema de espectroscopia Raman consiste de un laser de Argón (Coherent Inova 90) con un doble monocromador (Spex 1404) y un tubo fotomultiplicador de GaAs (Hamamatsu). Los espectros Raman se obtuvieron utilizando la línea de 5145 \AA . La morfología de los recubrimientos depositados y las características de los granos cristalinos que conforman las películas se analizaron por medio de un AFM Q-Scope 250 de QUESANT Instrument Corporation. El AFM utiliza una cabeza de $7\text{ }\mu\text{m}$ dotado con una aguja comercial microfabricada de Si_3N_4 , soportado por una mesa neumática de Newport Research Corporation que actúa como sistema de aislamiento mecánico. Todas las imágenes topográficas se obtuvieron con el AFM operando en aire en el modo de no contacto con un rango dinámico en el eje Z, con las siguientes condiciones específicas de funcionamiento: Broad band, Scan rate de 0.5-1.0 Hz, Scan resolution de 400-600, Integral gain de 150, Proportional gain de 150 y una Derivative gain de 0.

Los datos obtenidos con el AFM son procesados y analizados por medio del programa Scanning Probe Image Processor (SPIP) versión 4.3 de Image Metrology; para el análisis de los granos se utilizó el algoritmo de Watershed.

Resultados y discusión

La Figura 1 presenta los espectros Raman de 9 muestras crecidas a tres diferentes temperaturas del sustrato (T_s) con tres diferentes concentraciones de metano (C_{CH_4}) en H_2 . Las muestras designadas como A, B y C se crecieron con una concentración C_{CH_4} de 0.5% en H_2 a temperaturas de 850°C, 800°C y 750°C, respectivamente. Las muestras D, E y F se crecieron con una concentración C_{CH_4} de 1.0% en H_2 a temperaturas de 850°C, 800°C y 750°C, respectivamente. Las muestras G, H e I se prepararon con una concentración C_{CH_4} de 1.5% en H_2 a temperaturas de 850°C, 800°C y 750°C. La calidad cristalina y la pureza de la fase de diamante en las diferentes muestras se determinan

por la presencia del pico Raman en 1332 cm^{-1} y por el valor del FWHM de este pico en cada espectro. La Figura 2a) presenta la comparación entre los espectros Raman de una muestra de diamante natural y las muestras A, B y D, que son las que registran la mayor intensidad del pico en 1332 cm^{-1} . Los valores de FWHM medidos en la Figura 2a), son de 4.58 cm^{-1} para el diamante natural, y de 8.07 cm^{-1} , 9.24 cm^{-1} y 9.61 cm^{-1} para las muestras A, B y D, respectivamente. Los espectros Raman reportados en las figuras 1 y 2 presentan dos picos comunes, intensos y estrechos, el primero corresponde a la actividad óptica en 522 cm^{-1} del fonón de la red del silicio cristalino y el segundo en 1332 cm^{-1} es característico del fonón de primer orden triplemente degenerado del diamante cristalino. Los cambios en el valor de FWHM de los picos del silicio y del diamante se presentan en la Tabla 1. El valor de FWHM del diamante natural de 4.58 cm^{-1} , relativamente alto en comparación con el valor de 2 cm^{-1} reportado en trabajos previos con Micro-Raman (Donato M.G. *et al.* 2001), indica que el sistema

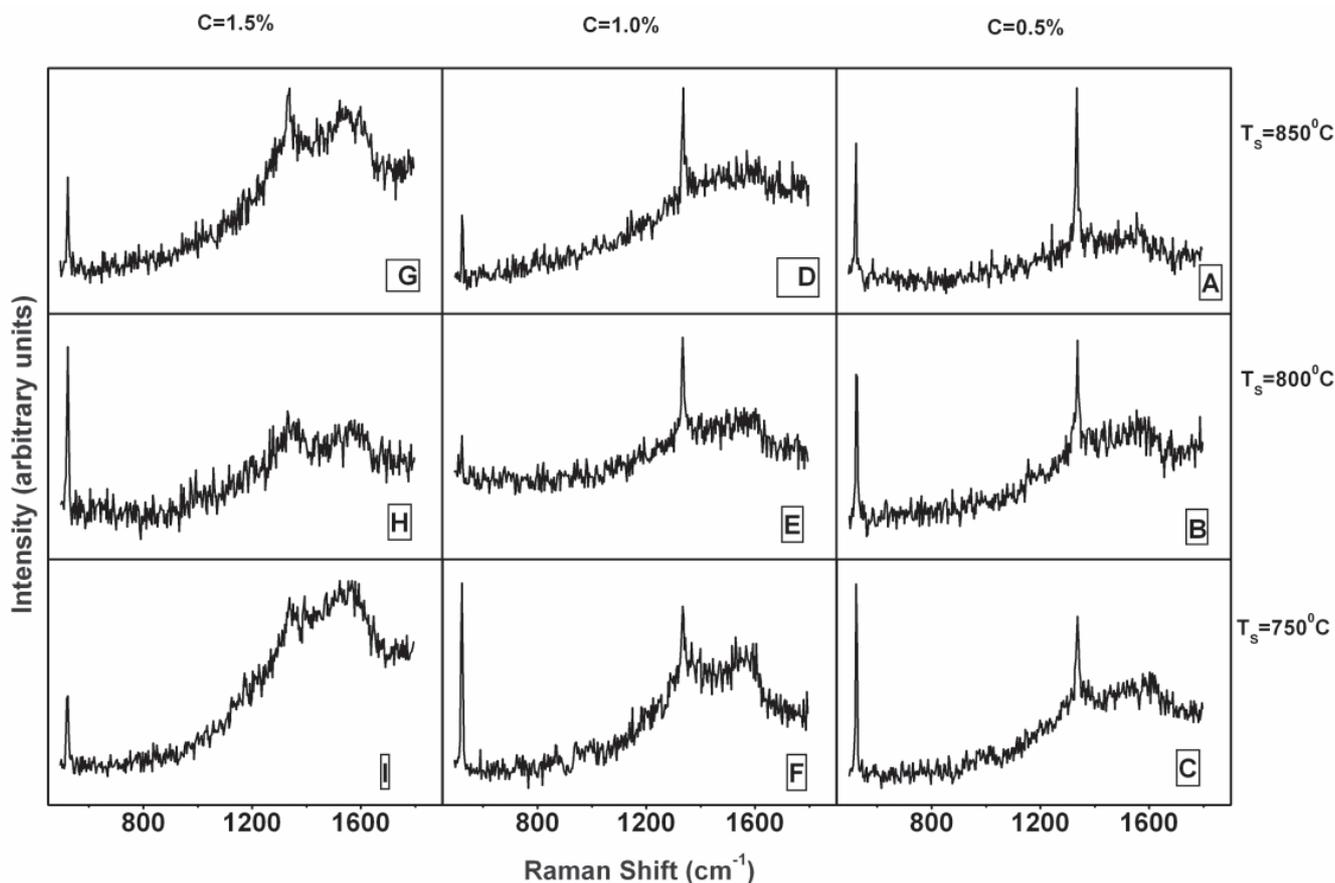


Figura 1. Espectros Raman de las películas de diamante depositadas por HFCVD, sobre sustratos sometidos a temperaturas de 750°C, 800°C y 850°C, utilizando una mezcla de metano en hidrógeno a concentraciones de 0.5%, 1% y 1.5%.

Tabla 1. Condiciones de crecimiento y parámetros Raman para las muestras de la Figura 2

Muestra	T _s (°C)	CH ₄ (%)	Pico del Silicio FWHM (cm ⁻¹)	Pico del diamante FWHM (cm ⁻¹)
Diamante Natural	—	—	—	4.58
A	850	0.5	5.40	8.07
A₁	850	0.5	6.75	9.88
B	800	0.5	7.22	9.24
D	850	1.0	7.11	9.61

Raman utilizado en esta investigación es de menor resolución. De todas formas e independiente de la resolución del sistema, el ensanchamiento de los picos en el espectro Raman y en consecuencia el aumento en el valor de FWHM es un indicador de la disminución en la calidad cristalina y la pureza del material. El incremento de la temperatura de 750°C a 850°C en combinación con la disminución de la concentración de CH₄ de 1.5% a 0.5% ocasiona una mejor definición y estrechamiento del pico Raman en 1332 cm⁻¹, lo que permite afirmar que la película A, crecida con una C_{CH4} de 0.5% en H₂ a una Ts de 850°C, es la de mejor calidad cristalina y la que presenta mayor abundancia de la fase *sp*³. En la medida que el espectro Raman revela la existencia de una banda ensanchada en 1580 cm⁻¹ se evidencia la existencia de fases desordenadas de carbono o fases policristalinas de grafito *sp*² que compiten con la fase *sp*³ del diamante en la formación de las películas (Yan X. *et al.* 2004). En el caso de la película I, depositada a 750°C y una concentración de CH₄ de 1.5%, el espectro

Raman presenta como característica sobresaliente un pico muy ensanchado con un máximo de intensidad en 1580 cm⁻¹ mientras que la actividad en 1332 cm⁻¹ se reduce al mínimo. La actividad óptica en 1580 cm⁻¹, correspondiente a la actividad del fonón de grafito policristalino (Wang S.B. *et al.*, 2000), también es grande en los espectros de las películas F, G y H; por el contrario el registro de esta banda es mínimo para la muestra A confirmando que esta película es la de mejor calidad y que ella está conformada de manera predominante por la fase *sp*³ del diamante.

La Figura 2b) registra la actividad Raman de dos películas, designadas como las muestras A y A₁ para efectos de identificación, crecidas ambas en las condiciones óptimas para producir el diamante con mayor concentración de la fase *sp*³, a temperatura de sustrato Ts=850°C y concentración de metano C_{CH4}=0.5%. Aparentemente los espectros de las muestras A y A₁ presentan características idénticas en la posición y forma de los picos Raman regis-

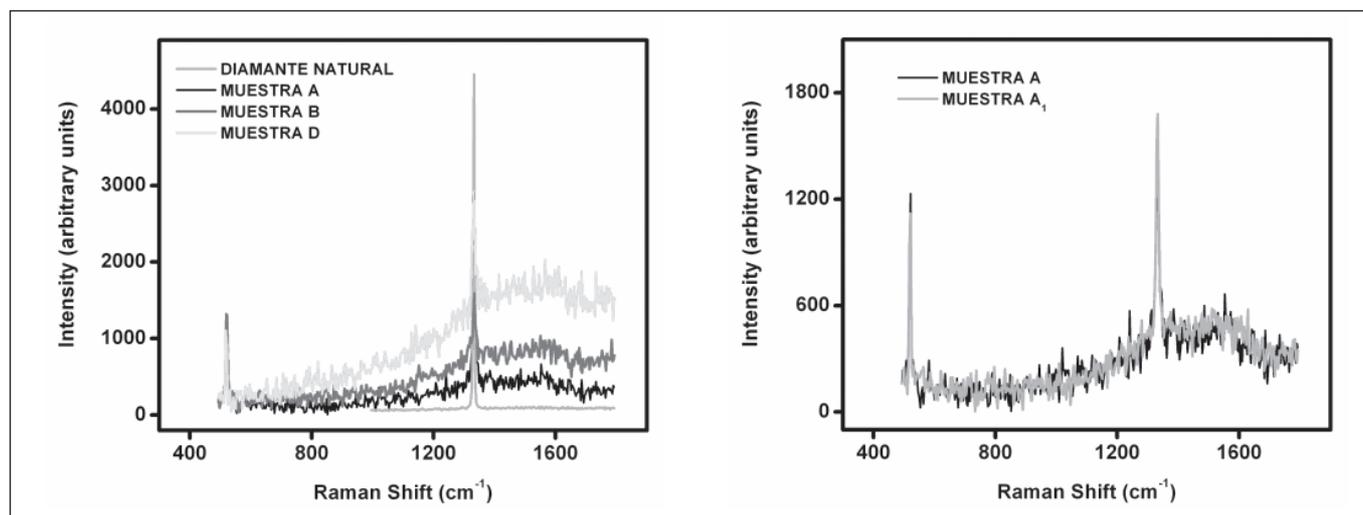


Figura 2. a) Comparación del espectro Raman del diamante natural con los espectros de las muestras A, B y D; la muestra A se depositó a Ts=850°C y C_{CH4}=0.5%, la muestra B se creció a Ts=800°C y C_{CH4}=0.5%, y la muestra D se preparó a Ts=850°C y C_{CH4}=1.0%. b) Comparación entre los espectros Raman de dos muestras crecidas en condiciones idénticas de temperatura de sustrato y concentración de metano (Ts=850°C y C_{CH4}=0.5%). En la Tabla 1 se resumen las principales características de los espectros Raman de estas películas de diamante.

trados en 522 y 1332 cm^{-1} , correspondientes a la actividad del silicio y del diamante, respectivamente. El registro cualitativo de dos espectros con características idénticas resulta normal para dos películas crecidas en la misma cámara por el mismo proceso de HFCVD y en las mismas condiciones termodinámicas. Sin embargo, como se puede ver en la Tabla 1, las medidas de FWHM de los picos Raman de estas películas, presentan diferencias. Estas diferencias se pueden explicar por limitaciones de resolución del sistema Raman utilizado o bien por factores físicos relacionados con la constitución de las películas, especialmente, el tamaño de los granos y la influencia de las fronteras de grano, que son factores determinantes de la dispersión Raman por efectos de las tensiones de la red (Pickard C.D.O. *et al.*, 1998). Sin embargo, las medidas de FWHM de los picos Raman no son el único criterio para evaluar la calidad porque inclusive películas con apreciable contenido de enlaces de grafito sp^2 , como las muestras B y D exhiben valores de FWHD de 9.24 cm^{-1} y 9.61 cm^{-1} , respectivamente, que son inferiores al valor FWHD de 9.88 cm^{-1} que presenta la película A_1 . Para dilucidar las aparentes contradicciones de los criterios de calidad y el motivo de la diferencia entre los dos valores de FWHM de los picos Raman de las películas A y A_1 se procede a evaluar las películas con el AFM lo que permitirá determinar con rigor el tamaño y las características de los granos.

Las imágenes por AFM de las películas examinadas, las muestras A y A_1 depositadas en las condiciones óptimas de $T_s=850^\circ\text{C}$ y concentración de metano $C_{\text{CH}_4}=0.5\%$, presentan cualitativamente similares características morfológicas (Figuras 3 y 4). Las superficies no son llanas sino que presentan una textura de colinas con formas de pirámides. Esto indica que el proceso de crecimiento produce cristallitos compactos con formas de pirámides que son producto de la

competencia entre las direcciones de crecimiento [111] y [100] (Hirabayashi K., Kurihara N.I. 1990). En la Figura 3b) y la Figura 4b) se observan detalles en tres dimensiones de las películas A y A_1 , respectivamente. En la Figura 3b) se puede apreciar el crecimiento por capas superpuestas en diferentes lados de la pirámide que constituye el grano de mayor área reportado en este estudio y señalado con la letra A en la Figura 3d). La imagen de AFM revela que cada grano de la película se desarrolla de manera independiente como una superposición de capas epitaxiales donde el límite de crecimiento de los granos es la unión o frontera entre los vecinos inmediatos. La Figura 3d) presenta una imagen AFM de 7.03 μm X 7.03 μm de una película de diamante con 41 divisiones, correspondientes a 41 granos cristalinos, obtenidas al aplicar el algoritmo de Watershed del programa SPIP. En dicha imagen se resaltan 3 granos designados como A, B y C, cuyos valores de área, volumen y perímetro están reportados en la Tabla 2. El grano de mayor tamaño presenta un valor de área de 9.7 μm^2 con un perímetro de 15.955 μm . Los otros dos granos examinados presentan valores inferiores pero del mismo orden de magnitud. La Figura 4d) es la imagen AFM de la distribución de las 44 divisiones que componen un área de 6.09 μm X 6.09 μm de la película A_1 . En este segundo caso se tienen racimos de granos y resulta difícil seleccionar granos simples. En detalle se midieron los grupos de granos señalados en la Figura 4d) con las letras A, B y C cuyas dimensiones se registran en la Tabla 2. Los grupos de granos A y B como conjunto presentan valores similares a los granos simples registrados en la película descrita previamente. Sin embargo el valor del área del grano simple de la película A_1 , designado como C, y que puede considerarse como de tamaño típico, presenta un área de 0.89 μm^2 y un perímetro de 4.958 μm , valores que son significativamente inferiores a las dimensiones que presentan los granos de la película A.

Tabla 2. Valores representativos del tamaño de grano y morfología de las películas de diamante presentadas en las Figuras 3 y 4

	Grano	Área (x 10 ⁶ nm ²)	Volumen (x 10 ⁹ nm ³)	Perímetro (nm)	Altura media (nm)
MUESTRA A RA: 90.1 nm RMS: 113 nm R _{p-v} : 834 nm	A	9.7	6.2	15955	635.2
	B	3.4	2.0	12310	597.8
	C	2.8	1.7	9043	618.9
MUESTRA A_1 RA: 65.6 nm RMS: 84.7 nm R _{p-v} : 564 nm	A	2.8	5.9	8364	2117
	B	1.6	3.3	6210	2125
	C	0.89	1.9	4958	2078

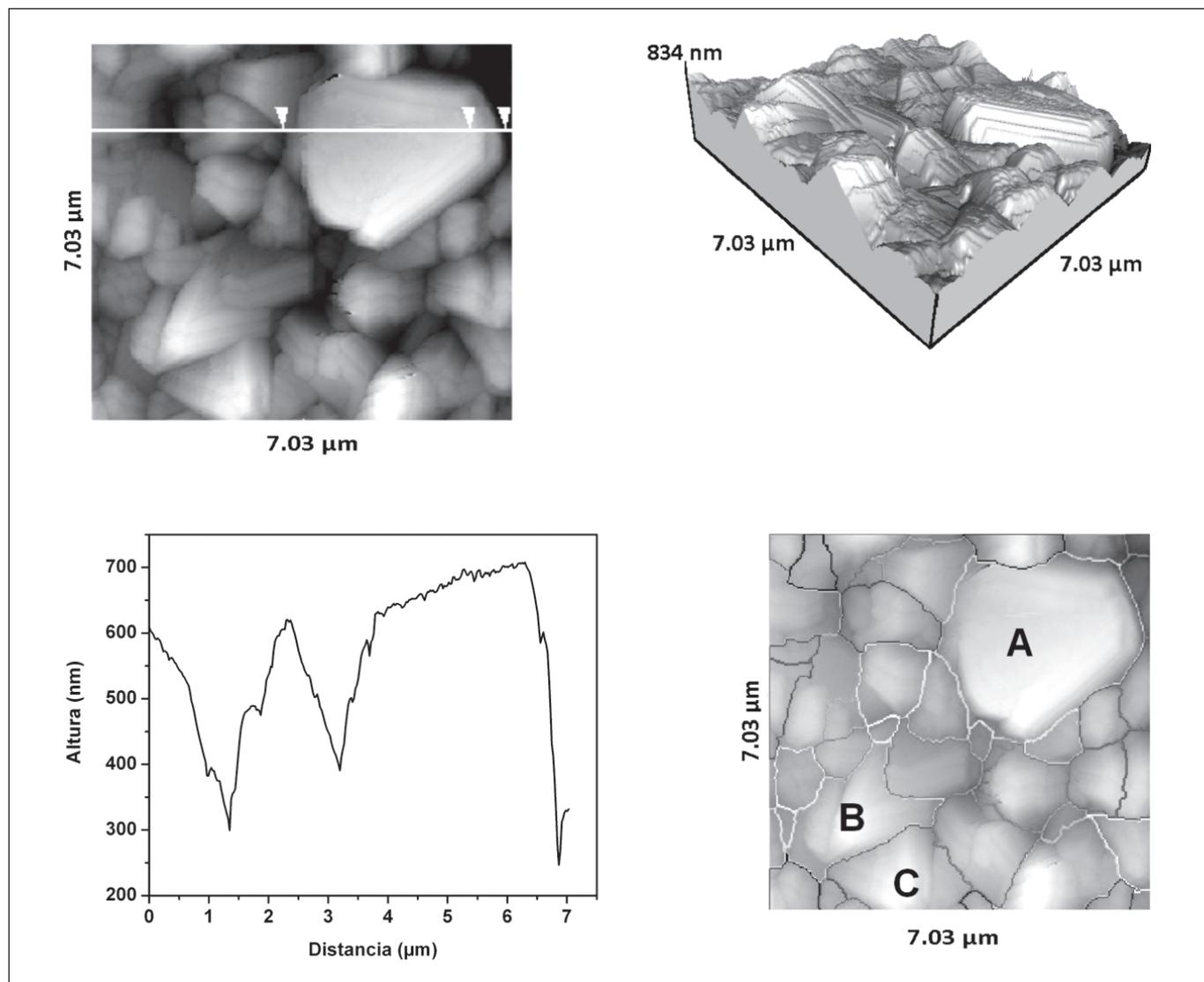


Figura 3. Imágenes AFM de la película de diamante tipo-A crecida a $T_s=850^\circ\text{C}$ y $C_{\text{CH}_4}=0.5\%$. a) Imagen en dos dimensiones. b) Imagen en tres dimensiones. c) Perfil topográfico a lo largo de la línea trazada en a). d) División de la película en granos; se distinguen los granos A, B y C que presentan áreas de $9.7 \mu\text{m}^2$, $3.4 \mu\text{m}^2$ y $2.8 \mu\text{m}^2$, respectivamente.

La Figura 3c) es el perfil topográfico a lo largo de la línea trazada sobre la Figura 3a) para la película de diamante denominada como A. El perfil indica que el grano de mayor tamaño registra una longitud de $3.67 \mu\text{m}$ y un máximo de cambio de altura de 466.7 nm . La Figura 4c) es el perfil topográfico de la línea registrada en la imagen 4a) de la película de diamante denominada A_1 . Los valores de longitud y cambio de altura de los granos de esta película son apreciablemente inferiores a los de la película tipo A. Para determinar con precisión las diferencias topográficas entre las superficies de las películas A y A_1 se evaluaron

los valores de: rugosidad promedio (RA), raíz cuadrática media de la rugosidad (RMS) y la diferencia de altura picovalle (R_{p-v}) y se registraron los valores consignados en la Tabla 2. Las diferencias de los valores de RA, RMS y R_{p-v} confirman que las superficies de las dos películas tienen diferente grado de rugosidad y que la película A tiene mayor rugosidad que la película A_1 . En particular el valor del parámetro RMS para la superficie de la Figura 3a) de la película A es de 113 nm , mientras que el valor de este parámetro es de 84.7 nm para el área de la Figura 4a) de la película A_1 ; similares diferencias presentan los otros

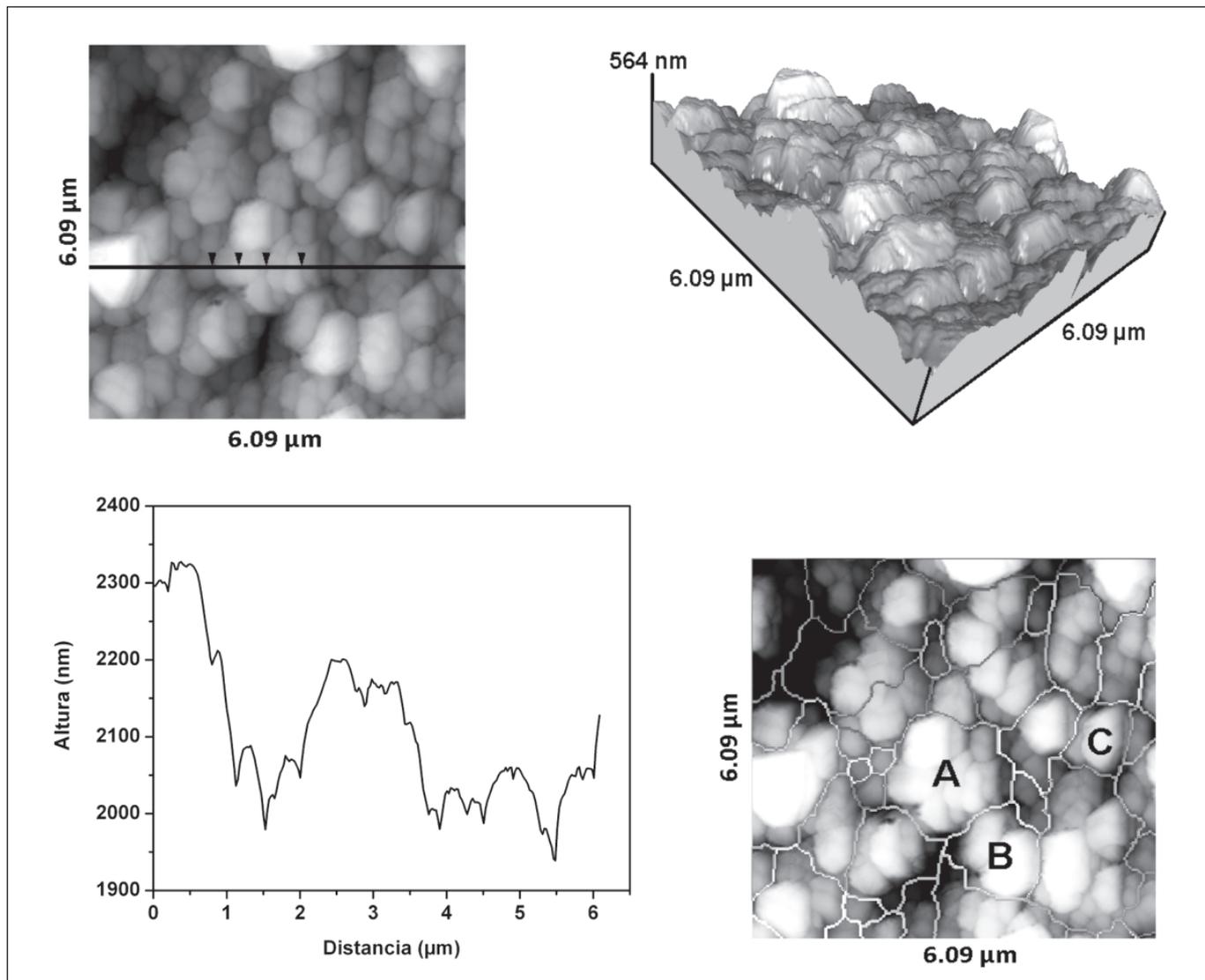


Figura 4. Imágenes AFM de la película de diamante tipo- A_1 crecida en las mismas condiciones de la película presentada en la figura 3, a $T_s=850^\circ\text{C}$ y $C_{\text{CH}_4}=0.5\%$. a) Imagen en dos dimensiones. b) Imagen en tres dimensiones. c) Perfil topográfico a lo largo de la línea trazada en a). d) División de la película en granos; se distinguen las agrupaciones de granos indicadas como A, B y C que presentan áreas de $2.8 \mu\text{m}^2$, $1.6 \mu\text{m}^2$ y $0.89 \mu\text{m}^2$, respectivamente.

parámetros de rugosidad de estas dos películas, según se confirma en la Tabla 2.

El análisis por AFM evidencia que la película denominada A está constituida por granos de mayor área que los de la película denominada A_1 . En correspondencia con el mayor tamaño de grano se tiene un espectro Raman con un pico en 1332 cm^{-1} más agudo y en consecuencia con menor valor de FWHM. Si bien el espectro Raman de las películas de diamante de mejor calidad, por el alto contenido de enlaces sp^3 , se distingue por presentar el pico más

agudo en 1332 cm^{-1} , este criterio de calidad no es el único que debe aplicarse para valorar las películas. Si las películas de diamante se destinan a recubrir superficies expuestas al desgaste por fricción el parámetro de calidad debe ser la baja rugosidad y no el tamaño de grano, en este aspecto la películas A_1 aunque tiene mayor valor de FWHM presentan menor rugosidad. La información obtenida con el AFM de los detalles de la morfología de la superficie de las películas de diamante evidencia que aún con las mismas condiciones termodinámicas de crecimiento el método de HFCVD produce películas con granos de diferente

calidad. Esto se puede explicar al considerar que la formación de películas cristalinas por las diferentes técnicas de plasma es altamente dependiente de la geometría del sistema de crecimiento. En este caso particular el método HFCVD utilizado para la preparación de las películas de diamante es dependiente de la geometría del filamento caliente de tungsteno, en cuya proximidad se forma el plasma que permite el depósito de la película, y de la distancia del alambre al sustrato. Si bien el filamento en todos los casos tiene la misma forma y diámetro la distancia entre el filamento y el sustrato no se puede repetir con rigor en la escala microscópica por problemas mecánicos al ensamblar el filamento en el equipo y por distorsiones en la forma del alambre cuando éste es sometido a las temperaturas de operación del orden de 2200°C.

Conclusiones

Se ha utilizado espectroscopia Raman y caracterización por AFM para establecer la calidad de las películas de diamante crecidas por HFCVD en función de la temperatura del sustrato y la concentración de la mezcla de gases CH₄-H₂. Las películas de diamante de mejor calidad de acuerdo con el análisis Raman (Muestras A, A₁) se depositaron a una temperatura de sustrato de 850°C y una concentración de 0.5% de metano en hidrógeno. En la medida que se disminuye la temperatura y se aumenta la concentración del metano las películas pierden calidad. Las películas crecidas a 750°C con una concentración de 1.5% de metano (Muestra I) son las de peor calidad y están constituidas principalmente por carbono amorfo o grafito policristalino. La agudeza del pico Raman registrado en 1332 cm⁻¹, y en consecuencia el valor mínimo de FWHM de este pico, es un buen indicador de la calidad de la película en función de la pureza y alto contenido de enlaces de carbono sp³ que conforman los microcristales de diamante. Sin embargo, películas crecidas en iguales condiciones termodinámicas por el método de HFCVD (Muestras A, A₁) presentan diferencias de calidad al ser evaluadas por el valor del parámetro FWHM del pico Raman y por medidas de tamaño de grano y rugosidad determinados por AFM. El grano de mayor tamaño registrado en este trabajo presenta un área de 9.7 μm². La caracterización por AFM permite establecer criterios finos de calidad de las películas en función del tamaño de los granos y de la rugosidad de la superficie. Las condiciones de calidad de las películas de diamante establecidas por espectroscopia Raman no coinciden con las condiciones de calidad asociadas con los parámetros de rugosidad medidos por AFM. El tipo de aplicación de las películas de diamante exige diferentes medidas de calidad y un riguroso control de los productos aún en iguales condiciones termodinámicas de crecimiento por el método de HFCVD. Las películas de

diamante depositadas por HFCVD, en iguales condiciones termodinámicas y de concentración de gases, presentan ligeras diferencias de reproducibilidad si se aplican los criterios de calidad de la espectroscopia Raman pero muestran notables diferencias morfológicas al examen con el AFM haciendo evidente que no son reproducibles en tamaño de grano y rugosidad.

Bibliografía

- Bundy F.P., Hall H.T., Strong H.M., Wentorf R.H.** 1955. Man-made diamonds, *Nature* **176**, 51-55
- Deryagin B.V., Fedoseev D.V., Polyanskaya N.D., Statenkova E.V.** 1976. Epitaxial diamond-graphite films, *Sov. Phys. Crystallogr.* **21**, 239-240
- Donato M.G., Faggio G., Marinelli M., Messina G., Milani E., Paoletti A., Santangelo S., Tucciarone A., Verona Rinati G.** 2001. High quality CVD diamond: a Raman scattering and photoluminescence study, *Eur. Phys. Journal B* **20**, 133-139
- Fan Y., Fitzgerald A.G., John P., Troupe C.E., Wilson J.I.B.** 2000. Scanning probe microscopy and spectroscopy of CVD diamond films, *Mikrochim. Acta* **132**, 435-441
- Hassan I.U., Rego C.A., Ali N., Ahmed W., O'Hare I.P.** 1999. An investigation of the structural properties of diamond films deposited by pulsed bias enhanced hot filament CVD, *Thin Solid Films* **355-356**, 134-138
- Hirabayashi K., Kurihara N.I.** 1991. Assignment of new facets developing on {111} surfaces of vapor-deposited diamond crystals, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30** (1A), L49-L51
- May P.W.** 2000. Diamond Thin Films: A 21st Century Material, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **358**, 473-495
- Pickard C.D.O., Davis T.J., Wang W.N., Steeds J.W.** 1998. Mapping crystalline quality in diamond films by micro-Raman spectroscopy, *Diamond and Related Materials* **7**, 238-242
- Pollak F.H., Tsu R.** 1983. In *Raman Characterization of Semiconductors Revisited*, SPIE Vol. 452 Spectroscopic Characterization Techniques for Semiconductor Technology, 26-43.
- Proffitt S.S., Probert S.J., Whitfield M.D., Foord J.S., Jackman R.B.** 1999. Growth of nanocrystalline diamond films for low field electron emission, *Diamond and Related Materials* **8**, 768-771.
- Sun F.H., Wang Y., Zhang Z.M., Chen M.** 2006. Fabrication and application of diamond-coated bearing support implements, *Key Engineering Materials* **315-316**, 210-214.
- Venables J.D., Wernick J.H., Angus J.C., Bell P.M., Cuomo J.J., DeVries R.C., Feldman A., Geis M.W., Hoover D.S., Messier R.** 1990. In *Status and Applications of Diamond and Diamond-Like Materials: An Emerging Technology*, The National Academy of Sciences, National Academy Press USA, 34
- Wang S.B., Zhang H.X., Zhu P., Feng K.** 2000. Structural and electrical properties of chemical vapor deposited diamond films doped by B⁺ implantation, *J. Vac. Sci. Technol. B* **18**, 1997-2000.

Yan X., Xu T., Chen G., Yang S., Liu H., Xue Q. 2004. Preparation and characterization of electrochemically deposited carbon nitride films on silicon substrate, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** (6), 907-913.

Ye H., Sun C.Q., Hing P. 2000. Control of grain size and size effect on the dielectric constant of diamond films, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33**, L148-L152.

Yoshitake T., Hara T., Nagayama K. 2003. The influence of the repetition rate of laser pulses on the growth of diamond thin films by pulsed laser ablation of graphite, *Diamond and Related Materials* **12**, 306-309.

Recibido: noviembre 6 de 2007.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2009.

SÍNTESIS DE HIDROGELES A PARTIR DE ACRILAMIDA Y ÁCIDO ALIMALÓNICO Y SU UTILIZACIÓN EN LA LIBERACIÓN CONTROLADA DE FÁRMACOS

Por

Gustavo A. Muñoz* & Fabio Zuluaga*

Resumen

Muñoz, G. A. & F. Zuluaga: Síntesis de hidrogeles a partir de acrilamida y ácido alimalónico y su utilización en la liberación controlada de fármacos. *Rev. Acad. Col. Cienc. Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **33** (129): 539-548, 2009. ISSN 0370-3908.

En este artículo se describe la preparación de hidrogeles a partir de acrilamida (AA) y ácido alimalónico (AAM) en diferentes proporciones, por polimerización vía radicales libres en solución acuosa. El ácido alimalónico se preparó por síntesis malónica a partir de malonato de dimetilo y bromuro de alilo. Los hidrogeles obtenidos se caracterizaron por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y por calorimetría diferencial de barrido (DSC). Se estudió la cinética de hinchamiento de los hidrogeles en agua desionizada, a 27°C, y 37°C con diferentes valores de pH. Finalmente se estudió la cinética de liberación de ácido acetilsalicílico como ingrediente activo a 37°C y pH = 7.4 (buffer de fosfatos).

Palabras clave: hidrogeles, ácido alimalónico, acrilamida, liberación controlada de fármacos, ácido acetilsalicílico.

Abstract

The preparation of hydrogels from acrylamide (AA) and allylmalonic acid (AAM) in different ratios, via free radical polymerization in aqueous solution, is described in this paper. Allylmalonic acid was obtained by malonic synthesis starting from dimethyl malonate and allyl bromide. The hydrogels obtained in this way were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and differential scanning calorimetry (DSC). The swelling kinetics of the hydrogels was studied in deionized water at 27°C and 37°C with different pH values. Finally, kinetic studies of the delivery of acetylsalicylic acid, as active component, at 37°C and pH = 7.4 (buffer of phosphates) were performed.

Key words: hydrogels, allylmalonic acid, acrylamide, drugs controlled delivery, acetylsalicylic acid.

* Grupo de Síntesis y Mecanismos de Reacción en Química Orgánica, Departamento de Química, Universidad del Valle, AA. 25360, Cali, Colombia.

Introducción

Debido al desarrollo de nuevos fármacos, algunos manipulados genéticamente, ha surgido la necesidad de desarrollar nuevos sistemas de transportes de fármacos que permitan liberar la cantidad adecuada del principio activo, en el momento adecuado y sobre sitios específicos dentro del organismo. En la actualidad, los hidrogeles han despertado gran interés científico y han sido ampliamente estudiados para dicha necesidad. Los hidrogeles son cadenas de polímero de origen natural o sintético unidas o entrecruzadas a través de enlaces covalentes y no covalentes, adquiriendo la forma de una red tridimensional capaz de absorber gran cantidad de líquidos a través del hinchamiento de su estructura, permaneciendo insoluble y sin perder su forma original (**Shibayama, M. et al.**, 1993; **Parejo, C. et al.**, 1998); es decir que son sistemas que pueden almacenar en su interior moléculas de bajo peso molecular. En estado seco son sólidos duros y se les conoce como xerogeles, pero cuando entran en contacto con un medio acuoso se hinchan hasta alcanzar un equilibrio fisicoquímico, convirtiéndose en sólidos elásticos o blandos conocidos como hidrogeles.

Una de las principales características de los hidrogeles, es el carácter hidrofílico que presentan, el cual se debe a la presencia de grupos solubles en agua como $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{CONH}_2$, $-\text{CONR}$, $-\text{SO}_3\text{H}$ en la matriz polimérica con una baja densidad de entrecruzamiento. Los hidrogeles son materiales biocompatibles, ya que ellos presentan una consistencia elástica debido principalmente al gran contenido de agua que pueden retener en su estructura con una baja tensión superficial, reduciendo así la irritación producida por fricción de los tejidos con los que entran en contacto (**Bruck, S.**, 1973; **Allen, P. et al.**, 1992), así como también disminuyendo la adsorción y desnaturalización de proteínas. Además, los hidrogeles no presentan en la mayoría de los casos formación de coágulos cuando entra en contacto con la sangre. Diferentes estudios tanto *in vitro* (**Karadag, E. et al.**, 1996) como *in vivo* (**Saraydin, D. et al.**, 2004) han demostrado que los hidrogeles sintéticos a partir de acrilamida presentan una buena biocompatibilidad al no observarse necrosis ni infección del tejido.

Durante el proceso de hinchamiento los hidrogeles aumentan su volumen varias veces sin perder su forma. Este comportamiento se debe al balance entre las fuerzas dispersivas y las fuerzas cohesivas intermoleculares que actúan sobre las cadenas hidratadas del polímero. La insolubilidad del hidrogel se debe a la existencia de una malla o red tridimensional en su estructura, formada por enlaces covalentes y fuerzas cohesivas débiles como fuer-

zas de Van der Waals, atracciones electrostáticas y enlaces de hidrógeno (**Allen, P. et al.**, 1992; **Ross-Murphy, S. et al.**, 1986).

Los hidrogeles representan un importante grupo de biomateriales y son considerados sistemas inteligentes, ya que tienen una respuesta de hinchamiento selectiva dependiendo de las condiciones del medio como pH, temperatura, fuerza iónica, campo eléctrico y magnético, etc (**Elliott, J. et al.**, 2004; **García, D. et al.**, 2004). Por lo tanto es posible realizar la liberación de diferentes principios activos hacia sitios específicos del organismo (por ejemplo en el pH característico del tracto gastrointestinal) y además se caracterizan por realizar una liberación de forma controlada en periodos de tiempo prolongados.

Para lograr una respuesta selectiva al medio se han sintetizado hidrogeles a partir de diferentes homopolímeros y copolímeros, teniendo una mayor aplicabilidad los últimos, ya que se combinan monómeros que proporcionen buenas propiedades mecánicas como la acrilamida, junto con otros monómeros que le den un carácter hidrofílico al material, así como también una respuesta selectiva a las condiciones del medio. Para conseguir una respuesta selectiva a la temperatura en muy común el uso de la N-isopropilacrilamida, ya que esta permite obtener polímeros con una temperatura de solución crítica más baja (sigla en inglés LCST) entre 25°C y 34°C, lo cual permite que se presente un cambio de fase en un rango de temperatura cercano a la temperatura corporal del cuerpo humano (**Qiu, Y. et al.**, 2001). Es así como se han obtenido hidrogeles de N-isopropilacrilamida con acrilamida (**Fundueanu, G. et al.**, 2009) como también con ácido itacónico (**Krusic, M. et al.**, 2006) logrando un mayor hinchamiento a 25°C. Por otra parte, cuando se quiere conseguir una respuesta al pH del medio se emplean monómeros ácidos y básicos los cuales al variar el pH del medio se pueden ionizar y generar una repulsión de cargas en el hidrogel que favorece el hinchamiento; es por eso que se han sintetizado hidrogeles de ácido acrílico (**Elliott, J. et al.**, 2004) los cuales se hinchan selectivamente a valores de pH básicos. También se ha copolimerizado el ácido acrílico con acrilamida para la liberación selectiva de 5-fluorouracilo en el colon (**Ray, D. et al.**, 2008). La acrilamida copolimerizada con ácido itacónico (**Caykara, T. et al.**, 2004; **El-Hamshary, H.**, 2007) permite obtener hidrogeles que presentan un mayor hinchamiento a valores de pH superiores a 8.0. Este tipo de hidrogel se ha estudiado recientemente para la liberación controlada y dirigida de paracetamol en el colon (**Krusic, M. et al.**, 2009). Otros ácidos como el ácido mesacónico (**Üzüm, Ö. et al.**, 2005) y el ácido maléico (**Bajpai, S. et al.**, 2006) copolimerizados con acrilamida se han empleado para obtener

hidrogeles sensibles al pH. Hasta el momento no se ha reportado la síntesis de hidrogeles con ácido alilmalónico como comonomero, el cual se espera que le dé un carácter hidrofílico al polímero y una respuesta selectiva al pH del medio, gracias a que cuenta con dos grupos carboxílicos. Además cuenta con un doble enlace monosustituido que facilita el proceso de polimerización en cadena.

Hasta el momento los hidrogeles han sido estudiados para numerosas aplicaciones biomédicas, y se han empleado para inmovilizar, encapsular y liberar de manera controlada antibióticos, anticoagulantes, anticonceptivos, entre otros, como también, nuevos fármacos producto de la revolución biotecnológica, como proteínas, péptidos y hormonas, que pueden ser fácilmente degradados si se administran de forma tradicional (cápsulas, tabletas, entre otros) (Peppas, N. A. *et al.*, 2000; Gallardo, A. *et al.*, 1998). En el presente trabajo se obtienen hidrogeles de acrilamida y ácido alilmalónico y se estudia el hinchamiento y la liberación *in vitro* de ácido acetilsalicílico como ingrediente activo.

Materiales y métodos

Para la obtención del ácido alilmalónico (AAM) se emplearon los siguientes reactivos: *ter*-butoxido de potasio (ALDRICH; 95%); tetrahidrofurano (THF); malonato de dimetilo (MERCK; 99%); bromuro de alilo (ALDRICH; 99%); acetato de etilo; sílica gel con un tamaño de partícula de 35-75 μm (MERCK); hidróxido de potasio (MALLINCKRODT, 88%); ácido clorhídrico.

Para el proceso de polimerización se emplearon los siguientes reactivos: acrilamida (AM) (ACIDEKA; 99%); N,N-metilenbisacrilamida (BIS) (ALDRICH; 99%); persulfato de potasio (MERCK; 99%); bisulfito de sodio (MERCK; 98%).

Se empleó además ácido acetilsalicílico (AAS) (Bayer, 99%) como ingrediente activo para estudiar la liberación controlada.

a. Síntesis del monómero ácido alilmalónico (AAM)

Para la obtención del ácido alilmalónico se llevaron a cabo dos etapas: en la primera de ellas se realizó la alquilación del malonato de dimetilo y en la segunda la hidrólisis del alilmalonato de dimetilo obtenido en la primera etapa.

Para la primera etapa, en un balón con dos bocas previamente flameado, se pesó bajo atmósfera de argón, una cantidad del *ter*-butoxido de potasio (69.75 mmol), luego el

balón con el *ter*-butoxido de potasio fue llevado a la línea de argón y se adicionaron 175 mL de THF previamente secado con sodio metálico. Posteriormente se adicionó el malonato de dimetilo (58.37 mmol) disuelto en 20 mL de THF seco. Esta mezcla se dejó bajo agitación magnética y continuo flujo de argón durante 30 minutos. Transcurrido este tiempo se adicionó lentamente el bromuro de alilo (69.33 mmol) y se agitó la reacción durante 5 horas a temperatura ambiente. A la mezcla de reacción se le realizó una extracción con acetato de etilo. La fase orgánica se secó con MgSO_4 anhidro y se rotaevaporó.

El alilmalonato de dimetilo obtenido se purificó por cromatografía de columna relámpago (sílica gel con tamaño de partícula de 35-75 μm , fase móvil acetato de etilo 0%-3% con un gradiente de 1% en hexano). La reacción tuvo un rendimiento del 73%.

En la segunda etapa, el alilmalonato de dimetilo (35.01 mmol) se disolvió en metanol al 90% el cual contenía KOH (419 mmol) y se calentó a reflujo durante 6 horas. Posteriormente la reacción se neutralizó con HCl concentrado y se realizó la extracción del producto con éter. La fase orgánica se secó con MgSO_4 anhidro y se rotaevaporó. El producto se lavó con hexano caliente obteniéndose finalmente el ácido alilmalónico como un sólido blanco; la reacción tuvo un rendimiento del 89%. Este sólido presentó un punto de fusión de 103.1-104.0 $^{\circ}\text{C}$ y se caracterizó a través de espectroscopia IR y RMN- ^1H .

b. Síntesis de hidrogeles

Se realizaron diferentes reacciones de copolimerización entre acrilamida (AA) y ácido alilmalónico (AAM) en presencia de N,N-metilenbisacrilamida (BIS) como agente entrecruzante; en la Figura 1 se muestran las estructuras de los monómeros y del agente entrecruzante. Las relaciones molares de AA/AAM empleadas fueron 2/1, 5/3, 1/1, con 1% del agente entrecruzante para la primera serie y 2% para la segunda. Las reacciones se llevaron a cabo en medio acuoso a 60 $^{\circ}\text{C}$, durante 8 horas y se empleó como iniciador de la polimerización la pareja redox persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$)/bisulfito de sodio (NaHSO_3), con una concentración de 0.5% de $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ y cantidades equimolares (1:1) de NaHSO_3 . La mezcla de reacción se desgasificó con argón durante 15 minutos para evitar la formación de burbujas en el material polimérico.

Una vez obtenidos los hidrogeles con forma cilíndrica, fueron sumergidos en agua destilada durante dos semanas para eliminar residuos de monómero sin reaccionar y fracciones solubles de polímero. La ausencia de monómero residual se determinó a través de espectroscopia infrarroja.

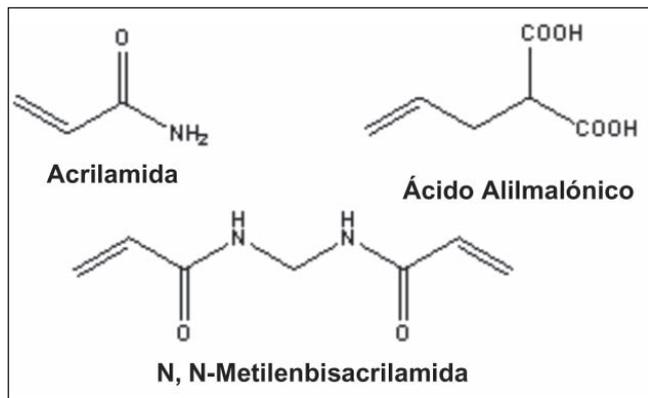


Figura 1. Estructura de los monómeros y del agente entrecruzante empleados para la síntesis de los hidrogeles.

Luego de este proceso se cortaron en forma de discos y se dejaron secar a temperatura ambiente durante dos semanas hasta alcanzar el estado xerogel. Estos últimos fueron calibrados a un tamaño de 7 mm de diámetro y 1 mm de espesor.

c. Caracterización espectroscópica y térmica

Los hidrogeles sintetizados se caracterizaron en estado seco a través de espectroscopia infrarroja, utilizando un espectrofotómetro Shimadzu FTIR-8400 y empleando el método de la pastilla de KBr.

Los hidrogeles también fueron estudiados mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC), para determinar sus respectivas temperaturas de transición vítrea (T_g). Para este estudio se empleó un equipo de calorimetría TA Instruments 2920 y se realizaron barridos desde -50 hasta 200°C a una velocidad de 10°C/min.

d. Estudios de hinchamiento

Para los estudios de hinchamiento, las pastillas de polímero en estado xerogel, fueron sumergidas previamente pesadas en agua desionizada. El estudio se realizó determinando el incremento de peso de las pastillas en función del tiempo, empleando una balanza analítica METTLER AE 260. El seguimiento se realizó hasta cuando no se presentaron variaciones considerables en el peso de cada pastilla, punto en el cual se alcanza el equilibrio de hinchamiento. Mediante este método se estudió la cinética de hinchamiento a 27°C y 37°C, como también a pH 2.0, 4.0, 7.4, 9.0 y 11.0.

La cantidad de líquido retenido dentro de cada hidrogel se determinó mediante el grado de hinchamiento (W) y el contenido de agua (H), cuyas expresiones matemáticas se muestran a continuación:

$$W = \left[\frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso húmedo}} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$H = \left[\frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \right] \times 100 \quad (2)$$

e. Estudios de liberación de ácido acetilsalicílico (AAS)

Para los estudios de liberación se emplearon los hidrogeles con proporciones monoméricas 5/3 y 1/1 de AA/AAM, tanto con 1% como con 2% de BIS, debido a que estas muestras alcanzaron un mayor grado de hinchamiento. La incorporación del fármaco en los hidrogeles se realizó introduciendo las pastillas en estado seco en una disolución acuosa del fármaco (100 ppm de ácido acetilsalicílico en solución buffer de fosfatos ajustada a pH de 7.4) a temperatura ambiente durante dos semanas.

Una vez se cargaron los hidrogeles con el fármaco se procedió a realizar los estudios de liberación. Estos se hicieron tanto desde las pastillas hinchadas como desde el estado xerogel, a 37°C, empleando como medio de liberación 100 mL de solución buffer de $\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{K}_2\text{HPO}_4$ 0.05M a un pH de 7.4 con agitación constante a 100 revoluciones por minuto; El seguimiento de la liberación se realizó tomando alícuotas del medio en distintos intervalos de tiempo y determinando la concentración de fármaco a través de espectroscopia ultravioleta a 213 nm. Una vez se realizaba la medición se devolvía la alícuota al medio para mantener el volumen constante.

Resultados y discusión

En la Figura 2 se muestra el espectro infrarrojo del ácido alilmalónico (AAM) obtenido por la síntesis malónica. En este se observa una banda a 1641 cm^{-1} debida a la vibración de tensión del enlace C=C presente en el monómero, también se observa una banda intensa entre 3000 y 3100 cm^{-1} característica de la vibración de tensión del grupo hidroxilo (C-O-H) y se observa una banda a 1694 cm^{-1} debida a la vibración de tensión del grupo carbonilo (C=O). Igualmente en la Figura 3 se muestra el espectro de RMN- ^1H del AAM, en el cual se observan dos dobletes a 4.98 y 5.04 ppm que integran para dos protones debido al CH_2 vinílico y un multiplete que integra para un protón a 5.78 ppm debido al CH vinílico; en este espectro se observa

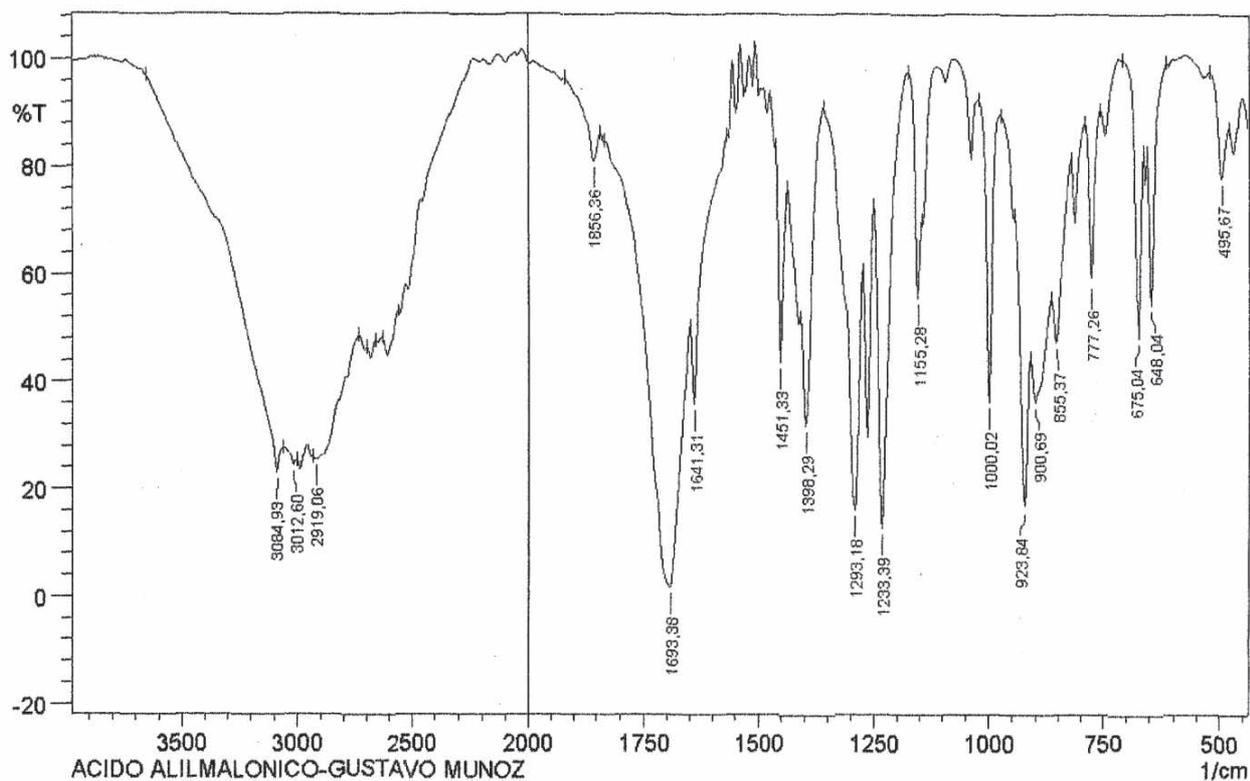


Figura 2. Espectro FTIR del monómero ácido alilmalónico.

además un singulete que integra para dos protones a 10.82 ppm correspondientes a los dos hidrógenos ácidos de los grupos carboxílicos (-COOH).

Obtenido el ácido alilmalónico, este se copolimerizó con acrilamida en diferentes proporciones para obtener los hidrogeles. La acrilamida es el monómero encargado de proporcionarle buenas propiedades mecánicas al material polimérico, mientras que el ácido alilmalónico le proporciona el carácter hidrofílico.

En la Figura 4 se muestra el espectro infrarrojo obtenido para un hidrogel 1/1 (AA/AAM) con 1% de BIS. En este se observa la vibración de tensión del grupo hidroxilo entre 3000 y 3400 cm^{-1} , también se observa entre 1680 y 1730 cm^{-1} la vibración de tensión de los grupos carbonilo (C=O) y entre 2855 y 2925 cm^{-1} la tensión de los grupos CH_2 . Debido al proceso de polimerización se espera que en el espectro de la Figura 4 no aparezcan las bandas características para los dobles enlaces monosustituídos. Se descarta la presencia de monómero sin reaccionar ya que no se observan las bandas para la vibración fuera del plano del enlace =C-H entre 905 y 915 cm^{-1} , como también entre 985 y 995 cm^{-1} , con lo cual queda evidenciado la presencia únicamente del copolímero.

A través de calorimetría diferencial de barrido se determinó la temperatura de transición vítrea (T_g) para cada uno de los hidrogeles sintetizados. En la Tabla 1 se encuentran los resultados obtenidos y se observa que a medida que aumenta el entrecruzamiento del polímero aumenta la T_g . Este comportamiento era de esperarse ya que un mayor entrecruzamiento de las cadenas poliméricas disminuye la movilidad de estas, por lo que se requiere una mayor energía para alcanzar la transición vítrea. A medida que aumenta el entrecruzamiento del polímero, aumenta la T_g . Igualmente se observa en la Tabla 1 que a medida que aumenta la cantidad del monómero hidrofílico (AAM) en el material, aumenta la T_g tanto para los hidrogeles que tienen 1% como para los que tienen 2% de BIS. Al incrementarse la cantidad de AAM, se pueden dar más interacciones entre las cadenas de polímero por medio de puentes de hidrógeno, es decir que se crean entrecruzamientos no covalentes.

Estudios de hinchamiento

Cuando los hidrogeles se encontraban en estado xerogel eran duros y opacos. Por el contrario en estado hidratado presentaban una consistencia blanda y se volvían trans-

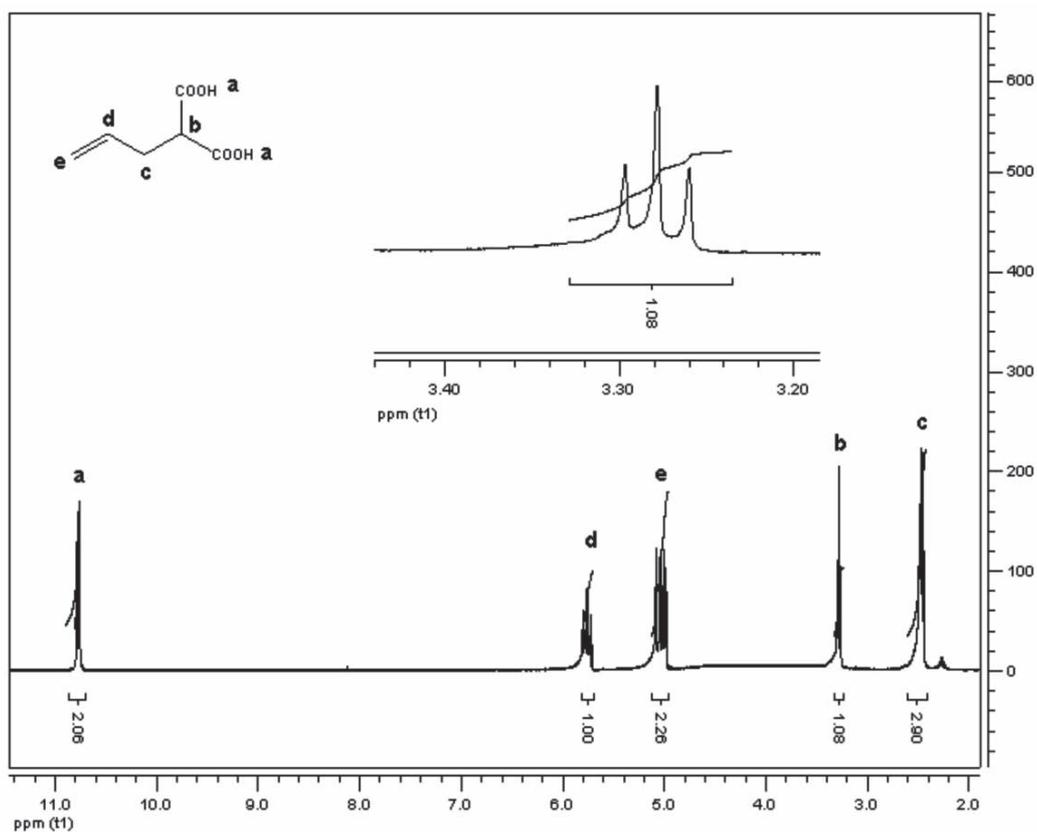


Figura 3. Espectro RMN- H^1 del ácido alimalónico.

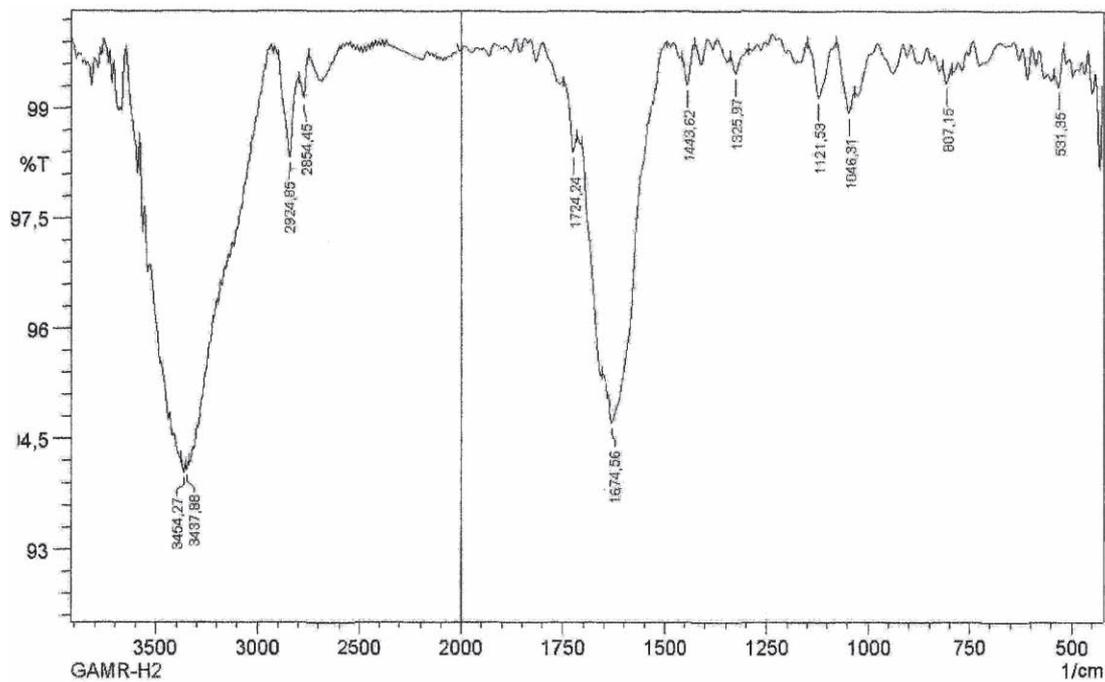


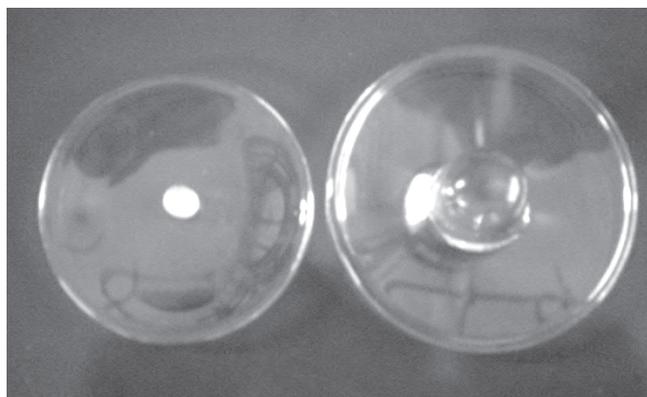
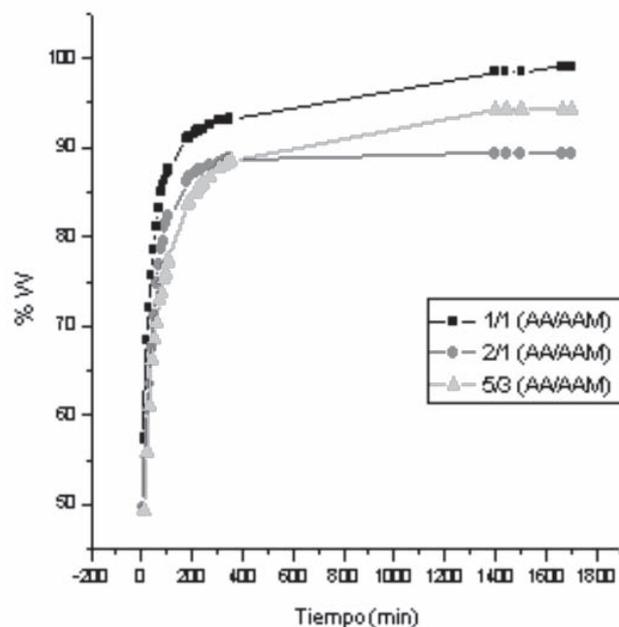
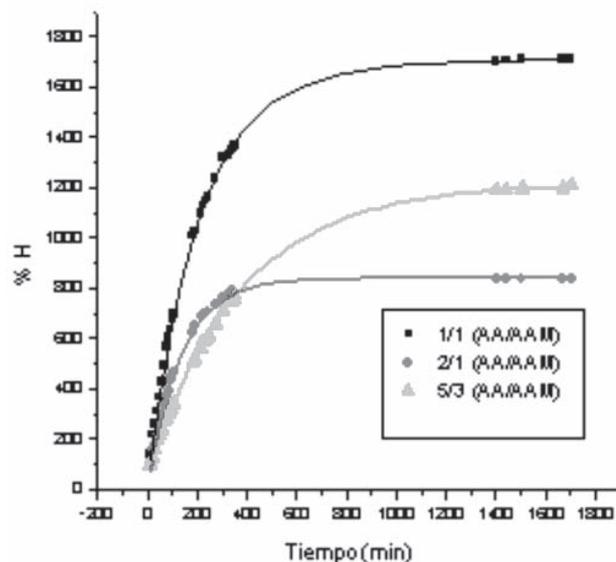
Figura 4. Espectro FTIR del hidrogel de acrilamida y ácido alimalónico (1/1) con 1% de BIS.

Tabla 1. Temperaturas de transición vítrea para los hidrogeles sintetizados.

Relación (AA/AAM)	BIS (%)	Tg (°C)
1/1	1.0	60.54
	2.0	68.24
5/3	1.0	59.64
	2.0	60.02
2/1	1.0	50.54
	2.0	59.01

parentes. En la Figura 5 se muestra un hidrogel 1/1 (AA/AAM) con 1% de BIS en estado xerogel y en estado hidratado.

Las Figuras 6 y 7 muestran el grado de hinchamiento (W) y el contenido de agua (H) respectivamente en función del tiempo, para los hidrogeles preparado con 1% de BIS en agua desionizada a 27°C. En estas gráficas se observa que a medida que aumenta el contenido de AAM, aumenta el grado de hinchamiento del material. Este comportamiento se debe a que el monómero mencionado tiene dos grupo carboxílicos que le dan un carácter hidrofílico al polímero, permitiendo la absorción de una mayor cantidad de agua que puede asociarse a través de puentes de hidrógeno con estos grupo ácidos de la cadena polimérica.


Figura 5. Estado xerogel y estado hidratado de un hidrogel 1/1 (AA/AAM) con 1% de BIS.

Figura 6. Grado de hinchamiento W (%) en función del tiempo para los hidrogeles con 1% de BIS a 27°C.

Figura 7. Contenido de agua H (%) en función del tiempo para los hidrogeles con 1% de BIS a 27°C.

En la Tabla 2 se resumen los datos obtenidos al estudiar el hinchamiento de los hidrogeles en agua desionizada a 27°C, y se observa para todas las muestras un grado de hinchamiento en el equilibrio cercano al 100%, lo cual indica que estos materiales poliméricos tienen una alta capacidad para absorber agua. En esta tabla también se observa como a medida que aumenta el porcentaje de entrecruza-

Tabla 2. Grado de hinchamiento en el equilibrio (W_∞), contenido de agua en el equilibrio (H_∞) y constantes de velocidad de hinchamiento (k) para los hidrogeles sintetizados.

Relación (AA/AAM)	BIS (%)	W_∞ (%)	H_∞ (%)	$K \times 10^4$ (min^{-1})
1/1	1.0	99.00	1705	6.156
	2.0	95.58	2162	5.194
5/3	1.0	94.36	1208	4.577
	2.0	93.65	1474	3.451
2/1	1.0	92.82	1293	1.196
	2.0	89.32	835.8	0.098

miento, disminuye el grado de hinchamiento (W). Al tener un mayor entrecruzamiento las cadenas de polímero disminuye el tamaño de poro del material y se disminuye la movilidad de las cadenas poliméricas, lo cual dificulta la entrada del agua al interior del hidrogel.

El estudio de hinchamiento mostró además, que los hidrogeles sintetizados siguen una cinética de segundo orden al ajustarse al modelo matemático que se muestra en la Ecuación 3, el cual se deduce tomando la velocidad de hinchamiento proporcional al cuadrado de la capacidad de hinchamiento disponible. Esta cinética demuestra que los hidrogeles obtenidos presentan un mayor carácter hidrofílico, a diferencia de copolímeros de N-isopropilacrilamida y ácido metacrílico que presentan una cinética de hinchamiento de primer orden debido a que se aumenta el carácter hidrofóbico del polímero (Prior-Cabanillas, A. *et al.*, 2005).

$$\frac{t}{W} = \frac{t}{W_\infty} + \frac{1}{KW_\infty^2} \quad (3)$$

Con el fin de estudiar los efectos de la temperatura corporal sobre el hinchamiento de los hidrogeles, se realizaron ensayos a 37°C observándose un aumento en el grado de hinchamiento de estos materiales. Con el aumento de la temperatura se rompen las fuerzas de entrecruzamiento débiles como los puentes de hidrógeno, aumentando el hinchamiento de la red polimérica.

Un efecto similar se observó al cambiar el pH del medio. En la Figura 8 se observa que al aumentar el pH se incrementa el grado de hinchamiento en el equilibrio para las muestras con 1% de entrecruzamiento. Tendencias similares a estas han sido reportadas previamente para hidrogeles de acrilamida y ácido itacónico (El-Hamshary, H., 2007).

A valores de pH ácidos los grupos carboxilos (-COOH) presentes en el polímero disminuyen las interacciones

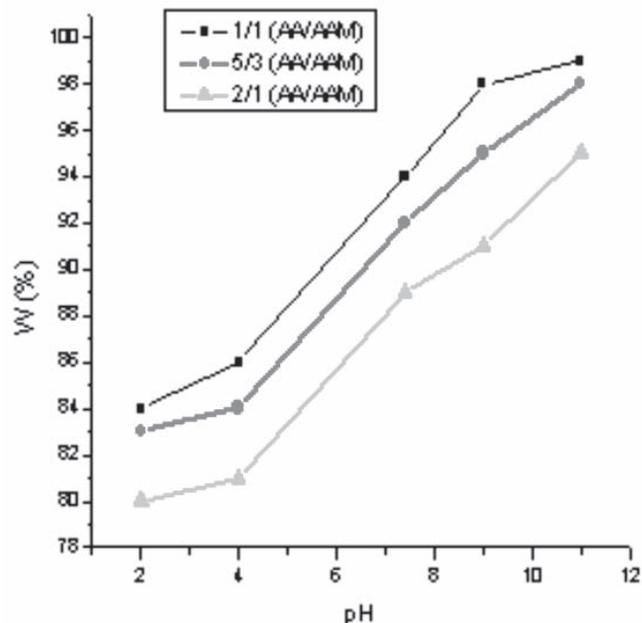


Figura 8. Grado de hinchamiento en el equilibrio en función del pH del medio para los hidrogeles con 1% de BIS.

repulsivas entre las cadenas poliméricas, las cuales se aproximan entre sí mediante enlaces de hidrógeno entre los grupos carboxílicos y los grupos amida, disminuyendo el hinchamiento del material. A valores de pH neutro y alcalino se observa lo contrario, se lleva a cabo una reacción ácido-base en la cual los grupos carboxílicos se convierten en carboxilatos (-COO⁻), la formación de esta especie conlleva a la separación de las cadenas poliméricas tanto por repulsiones electrostáticas entre las cargas negativas, como también por el rompimiento de los puentes de hidrógeno intramoleculares permitiendo así un mayor hinchamiento del material.

Para los hidrogeles con 2% de entrecruzamiento se observó un comportamiento similar frente al pH del medio.

Libерación de ácido acetilsalicílico (AAS)

Se estudió la liberación *in vitro* de ácido acetilsalicílico desde los hidrogeles en estado hidratado y en estado xerogel. El estudio cinético se realizó empleando el modelo matemático representado en la Ecuación 4, donde M_i/M_∞ representa la fracción de fármaco liberado, K es una constante de proporcionalidad y n es el modo de transporte del fármaco (Sáez, V. *et al.*, 2004; Peppas, N. A. *et al.*, 2004).

$$\frac{M_i}{M_\infty} = Kt^n \quad (4)$$

Para conocer si el mecanismo de liberación del fármaco es de tipo Fickiano o anómalo, se debe calcular el modo de transporte n . Cuando n tiene un valor de 0.5 la liberación del fármaco sigue el mecanismo de difusión Fickiano; si n es diferente a 0.5, el mecanismo de difusión se considera no Fickiano o anómalo y cuando n es igual a 1, se considera que sigue el mecanismo de difusión de Schott (Katime, I. et al., 1999; Katime, I. et al., 2001).

En la Figura 9 se representa la liberación del fármaco desde los hidrogeles 1/1 y 5/3 con 1% de BIS. En la Tabla 3 se muestran los valores de n obtenidos para la liberación del fármaco desde los hidrogeles en estado hinchado. Se observa que los valores de n están alrededor de 0.5, lo cual significa que la liberación es de tipo Fickiano, es decir que la liberación esta controlada únicamente por el fenómeno de difusión del fármaco a través de la matriz polimérica (Katime, I. et al., 1999).

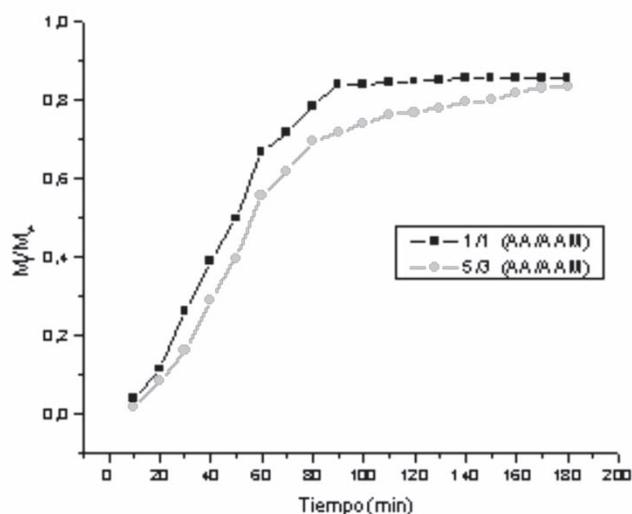


Figura 9. Cinética de liberación de ácido acetilsalicílico (AAS) desde los hidrogeles 1/1 y 5/3 (AA/AAM) con 1% de BIS a 37°C.

Tabla 3. Valores de n calculados para la liberación desde los xerogeles a 37°C

Relación (AA/AAM)	BIS (%)	n
1/1	1.0	0.51
	2.0	0.48
5/3	1.0	0.50
	2.0	0.54

Por otra parte al estudiar la cinética de liberación desde el estado xerogel, se obtuvieron valores de n mayores de 0.5 (Tabla 4), lo cual indica que la liberación sigue una cinética anómala o no Fickiana. En este caso el fármaco no solo se libera por el fenómeno de difusión, sino también por la relajación viscoelástica del polímero durante el proceso simultáneo de hinchamiento (Katime, I. et al., 1999; Sáez, V. et al., 2004).

Tabla 4. Valores de n calculados para la liberación desde los xerogeles a 37°C

Relación (AA/AAM)	BIS (%)	n
1/1	1.0	0.88
	2.0	0.81
5/3	1.0	0.74
	2.0	0.70

Conclusiones

Se sintetizaron y caracterizaron hidrogeles por copolimerización vía radicales libres, a partir de acrilamida y ácido alilmalónico. Estos sistemas poliméricos presentaron una cinética de hinchamiento de segundo orden. Se observó además, un mayor hinchamiento en los hidrogeles con mayor cantidad de ácido alilmalónico y 1% de entrecruzamiento.

Los hidrogeles obtenidos presentaron una respuesta selectiva frente a las condiciones del medio, ya que el grado de hinchamiento aumentó con el incremento de la temperatura a 37°C y con el aumento del pH.

El estudio cinético de liberación del ácido acetilsalicílico, mostró un mecanismo de difusión Fickiano desde los hidrogeles hinchados, mientras que desde el estado xerogel el mecanismo de difusión fue anómalo o no Fickiano.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle y al Centro de Excelencia de Nuevos Materiales CENM, por el apoyo financiero para la realización de este proyecto.

Bibliografía

Allen, P.; Bennett, D. J.; Williams, D. 1992. Water in methacrylates—I. Sorption and desorption properties of poly (2-hydroxyethyl methacrylate-co-glycol dimethacrylate) networks. Eur. Polym. J. 28, 347-352

- Bajpai, S.; Johnson, S.** 2006. Poly(acrylamide-co-maleic acid) Hydrogels for Removal of Cr (VI) from Aqueous solutions, Part I: Synthesis and Swelling Characterization. *J. Appl. Polym. Sci.* **100**, 2759-2769.
- Bruck, S.** 1973. Polymeric materials: Current status of biocompatibility. *Biomater. Med. Devices, Artif. Org.* **1**, 79-98.
- Caykara, T.; Dogmus, M.** 2004. The effect of solvent composition on swelling and shrinking properties of poly (acrylamide-co-itaconic acid) hydrogels. *Eur. Polym. J.* **40**, 2605-2609.
- El-Hamshary, H.** 2007. Synthesis and water sorption studies of pH sensitive poly (acrylamide-co-itaconic acid) hydrogels. *Eur. Polym. J.* **43**, 4830-4838.
- Elliott, J.; Macdonald, M.; Nie, J.; Bowman, C.** 2004. Structure and swelling of poly (acrylic acid) hydrogels: effect of pH, ionic strength, and dilution on the crosslinked polymer structure. *Polymer.* **45**, 1503-1510.
- Fundueanu, G.; Constantin, M.; Stanciu, C.; Theodoridis, G.; Ascenzi, P.** 2009. pH- and temperature-sensitive polymeric microspheres for drug delivery: the dissolution of copolymers modulates drug release. *J Mater Sci: Mater Med.* **20**, 2465-2475.
- Gallardo, A.; San Román, J.** 1998. Contribución de los polímeros al diseño y desarrollo sistemas microencapsulados de interés biomédico *Rev. Plastic. Modern.* **75** (504), 577-581.
- García, D.; Escobar, J.; Bada, N.; Casquero, J.; Hernández, E.; Katime, I.** 2004. Synthesis and characterization of poly (methacrylic acid) hydrogels for metoclopramide delivery. *Eur. Polym. J.* **40**, 1637-1643.
- Karadag, E.; Saraydin, D.; Cetinkaya, S.; Giiven, O.** 1996. In vitro swelling studies and preliminary biocompatibility evaluation of acrylamide-based hydrogels. *Biomaterials.* **17**, 67-70.
- Katime, I.; Novoa, R.; Díaz De Apodaca, E.; Mendizábal, E.; Puig, J.** 1999. Theophylline release from poly (acrylic acid-co-acrylamide) hydrogels. *Polymer Testing.* **18**, 559-566.
- ; —————; **Zuluaga, F.** 2001. Swelling kinetics and release studies of theophylline and aminophylline from acrylic acid/*n*-alkyl methacrylate hydrogels. *Eur. Polym. J.* **37**, 1465-1471.
- Krusic, M.; Filipovic, J.** 2006. Copolymer hydrogels base don N-isopropylacrylamide and itaconic acid. *Polymer.* **47**, 148-155.
- ; **Ilic, M.; Filipovic, J.** 2009. Swelling behaviour and paracetamol release from poly *N*-isopropylacrylamide-itaconic acid) hydrogels. *Polym. Bull.* **63**, 197-211.
- Parejo, C.; Ortiz, C.; Vázquez, B.; Gallardo, A.; San Román, J.** 1998. Hidrogeles polímeros para aplicaciones biomédicas. Comportamiento de sistemas neutros. *Rev. Plastic. Modern.* **75** (499), 96-100.
- Peppas, N. A.; Bures, P.; Leobandung, W.; Ichikawa, H.** 2000. Hydrogels in pharmaceutical formulations. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* **50**, 27-46.
- ; **Leobandung, W.** 2004. Stimuli-sensitive hydrogels in chronotherapeutic Applications. *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.* **15**, 125-144.
- Prior-Cabanillas, A.; Quijada-Garrido, I.; Frutos, G.; Barrales-Rienda, J.M.** 2005. Influence of the swelling history on the swelling kinetics of stimuli-responsive poly [(N-isopropylacrylamide)-co-(methacrylic acid)] hydrogels. *Polymer.* **46**, 685-693.
- Qiu, Y.; Park, K.** 2001. Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews.* **53**, 321-339.
- Ray, D.; Mohapatra D.; Mohapatra, R.; Mohanta, G.; Sahoo, P.** 2008. Synthesis and colon-specific drug delivery of a poly (acrylic acid-co- acrylamide)/MBA nanosized hydrogel. *J. Biomater. Sci. Polymer Edn.* **19**, 1487-1502.
- Ross-Murphy, S. B.; McEvoy, H.** 1986. Fundamentals of hydrogels and gelation. *Polym. J.* **18**, 2-7.
- Sáez, V.; Hernández, E.; Sanz, L.** 2004. Mecanismos de liberación de fármacos desde materiales polímeros. *Rev. Iberoam. Polim.* **5** (1), 55-65.
- Saraydin, D.; Ünver-Saraydin, S.; Karadag, E.; Koptagel, E.; Güven, O.** 2004. In vivo biocompatibility of radiation crosslinked acrylamide copolymers. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res B.* **217**, 281-292.
- Shibayama, M.; Tanaka, T.** 1993. Volume phase transition and related phenomena of polymer gels. *Adv. Polym. Sci.* **109**, 1-62.
- Üzüm, Ö.; Karadag, E.** 2005. Equilibrium Swelling Studies of Highly Swollen Acrylamide/Mesaconic Acid Hydrogels. *J. Appl. Polym. Sci.* **96**, 2253-2259.

Recibido: marzo 16 de 2009.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2009.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MATEMÁTICA DE PÉPTIDOS DE ALTA UNIÓN DE MSA-2 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LA PROBABILIDAD Y LA ENTROPÍA

Por

**Javier Rodríguez^{1,2,3}, Catalina Correa^{1,3}, Signed Prieto^{1,3}, Diana Cardona¹,
Sarith Vitery^{1,2}, Germán Puerta^{1,2}, Yolanda Soracipa¹, Pedro Bernal^{1,3}**

Resumen

Rodríguez, J., C. Correa, S. Prieto, D. Cardona, S. Vitery, G. Puerta, Y. Soracipa & P. Bernal. Caracterización física y matemática de péptidos de alta unión de MSA-2. Aplicación de la teoría de la probabilidad y la entropía. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **33**(129): 549-557, 2009. ISSN 0370-3908.

MSA-2 proteína 2 de superficie de membrana del merozoito es una proteína de 45-kDa anclada en la membrana del merozoito que ha sido asociada con el desarrollo de inmunidad protectora en contra de la malaria.

Se construyó un espacio de probabilidad que cuantifica la posibilidad de aparición de los 20 aminoácidos en cada posición para péptidos con tamaño de 20 residuos; para 3 secuencias superpuestas cada 10 aminoácidos de la proteína MSA-2 comprobadas experimentalmente de alta unión, partiendo de éste espacio se calculó la probabilidad, sumatoria de probabilidad y entropía para todas las secuencias de la proteína, con el fin de diferenciar de forma objetiva y reproducible los péptidos de alta unión y baja unión, por medio de teorías físicas y matemáticas.

Se encontraron rangos para la probabilidad, Sumatoria de Probabilidad y Entropía asociados al macroestado unión y al macroestado no unión, que permiten diferenciar de forma objetiva y reproducible los péptidos de alta unión de los que no lo son acertando en el 100% de los casos estudiados según trabajos experimentales.

¹ Grupo de Investigación Insight.

² Línea de profundización Física y Matemáticas aplicadas a la medicina Universidad Militar Nueva Granada.

³ Centro de Investigaciones, Clínica del Country. Direcciones: Cra. 79b #51-16 sur, Int-5 apto. 102, grupoinight2025@yahoo.es.

El fenómeno de unión de MSA-2 al merozoito presenta un orden físico y matemático acausal, caracterizable a partir de la probabilidad y la entropía.

Palabras clave: probabilidad, entropía, eritrocito, MSA-2, alta unión.

Abstract

MSA-2 protein surface of membrane 2 of the merozoite is a protein of 45-kDa anchored in the membrane of the merozoite which has been associated with the development of protective immunity against the malaria.

By means of the construction of the space of probability the possibility of appearance of the 20 amino acids was quantified in each position for peptides with size of 20 residues; for 25 sequences overlapped each 10 amino acids of the protein MSA-2, starting from this space was calculated the probability, summary of probability and entropy for all the sequences, with the purpose of differing of objective and reproducible form the peptides of high binding and low binding, by means of physical and mathematics theories.

The values of probability, summary of Probability and Entropy for the proven experimentally sequences of high binding vary among the ranges associated to the binding macro state, while all these same values for the experimental low binding peptides are outside of the ranges associated to the binding macro. The values of probability, summary of probability and entropy differentiate the high binding peptides from low binding peptides, guessing right in 100% of the studied cases, according to experimental studies.

This methodology facilitates the experimental work, because it can be useful to predict high binding peptides of objective and reproducible way in the MSA-2 protein, the binding phenomenon of MSA-2 to merozoite presents a physical and mathematical order, starting from the probability and the entropy.

Key words: probability, entropy, erythrocyte, MSA-2, high binding.

Introducción

La posibilidad de ocurrencia de un evento en el futuro es cuantificable a través de la probabilidad, ésta medida matemática carece de dimensión (**Laplace**, 1995; **Feynman et al.**, 1964a; **Mood.**, 1974; **Blanco**, 1996). La termodinámica y la mecánica estadística, nacieron como teorías que buscan resolver el problema de determinar el estado dinámico de sistemas como el gaseoso los cuales están compuestos por un número de moléculas de orden del número de Avogadro, 10^{23} , pues al partir del análisis individual de cada partícula es imposible determinar el estado dinámico de sistemas, para esto sería necesario resolver 10^{23} ecuaciones diferenciales (**Feynman et al.**, 1964b). Con el fin de caracterizar el estado de sistemas como el gaseoso los conceptos de macroestado y de microestado se han enunciado, el macroestado determina una distribución general del sistema, mientras que el microestado está relacionado con las configuraciones particulares que puede tener una de estas distribuciones; por ejemplo si en un volumen fijo hay un número de partículas, uno de los macroestados

asociado al sistema es la presión, y cada uno de sus valores están caracterizados por diferentes configuraciones de velocidades de las partículas en el volumen, y éstas son los microestados asociados a este macroestado (**Tolman**, 1979; **Matvéev**, 1987).

En el contexto de la teoría cinética de los gases Boltzmann definió inicialmente la entropía como una medida proporcional al logaritmo del número de microestados que posee un sistema en estado de equilibrio asociados a un macroestado específico, es decir los microestados que hacen que el sistema sea el mismo desde un punto de vista macroscópico, en la mecánica estadística, la cual es una generalización de la termodinámica, este concepto fue desarrollado para los sistemas fuera del equilibrio como una medida proporcional a la suma de los productos de la probabilidad de cada microestado por su logaritmo, partiendo de las probabilidades de sus posibles distribuciones microscópicas, la constante de proporcionalidad es la constante de Boltzmann (**Feynman et al.**, 1964c).

La misma expresión de la entropía en la mecánica estadística fue encontrada por Shannon al buscar la forma de cuantificar de forma objetiva la cantidad de información que contiene un mensaje, en el contexto de la teoría de la información, esta medida es interpretada como una medida objetiva de la cantidad de información que posee un sistema (**Froden y Royo**).

La malaria es una de las principales causas de morbimortalidad en el mundo entero (World Health organization, 2005). Por sus características, la enfermedad se presenta principalmente en zonas tropicales, tomando allí la forma de epidemia. Un gran número de los individuos que sufren de malaria son infectados por *Plasmodium Falciparum*; el ciclo eritrocítico de la malaria es caracterizado por la invasión periódica de merozoitos del *Plasmodium* a los eritrocitos. Ésta invasión es un proceso que requiere el reconocimiento, unión, orientación e interiorización del merozoito dentro del eritrocito, todos estos procesos son mediados por interacciones receptor ligando (**Aikawa et al., 1978; Hadley et al., 1986**).

MSA2, es la segunda molécula principal presente en la superficie del merozoito del *P. Falciparum*, es una glicoproteína de 35±56 kDa (**Stanley et al., 1985; Fenton et al., 1989**). Es expresada doce horas antes de la invasión del merozoito y su máxima concentración es observada 42 horas después de la invasión (**Heidrich et al., 1983; Heidrich et al., 1984**). MSA2 está encontrada dentro del grupo de antígenos reconocidos por anticuerpos que aglutinan merozoitos (**Lyon et al., 1986; Lyon et al., 1989**). Además anticuerpos de la MSA2 han mostrado inhibir invasión de una forma dosis-dependiente *in Vitro* (**Clark et al., 1989; Ramasamy, 1987, Epping et al., 1988**). En un trabajo previo péptidos sobrelapados cada 10 aminoácidos con un tamaño de 20 residuos cada uno fueron sintetizados y usados en ensayos de unión de eritrocitos, con el objetivo de identificar las secuencias importantes de la proteína que interactúan con los eritrocitos, encontrando que de las 25 secuencias posibles 3 fueron halladas experimentalmente de alta unión al eritrocito (**Ocampo et al., 2000**), la actividad de unión químicamente es definida como la cantidad (en pico-moles) de péptidos que se unieron específicamente a los eritrocitos por péptido adicionado (en pico-moles), definiendo la alta unión como una actividad de unión = 2% (**Ocampo et al., 2000**).

El propósito de la presente investigación es desarrollar a partir de la teoría de la probabilidad, y la ley de la Entropía una metodología física y matemática que permita caracterizar matemáticamente la unión de péptidos de la MSA-2 al receptor del glóbulo rojo.

Definiciones

Macroestado: Se definen dos macroestados: el macroestado de unión, que corresponde a las secuencias que presentan alta unión y el de no unión, que representa las secuencias que no presentan alta unión.

Microestado: Cualquier secuencia específica de veinte aminoácidos.

Tipo de secuencia: Microestados que presentan el mismo valor en la entropía, suma de las probabilidades y/o probabilidad.

Probabilidad Laplaciana: La probabilidad de un aminoácido A en una posición específica i se define como el cociente entre la frecuencia de aparición de este aminoácido en dicha posición y el total de aminoácidos (**Laplace, 1995; Feynman et al., 1964a; Mood., 1974; Blanco, 1996**).

$$P(A_i) = \frac{\text{Frecuencia de aparición del aminoácido } A \text{ en la posición } i = A_i}{\text{Total de aminoácidos}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Sumatoria de probabilidad: La sumatoria de la probabilidad de una secuencia específica se define como la sumatoria de la probabilidad de aminoácidos componentes, esto es la cuantificación matemática de las probabilidades de aparición de cada aminoácido por posición.

$$\text{Sum}P = \sum_{i=1}^{20} P(A_i) \quad \text{Ecuación 2}$$

Probabilidad de una Secuencia: La probabilidad de una secuencia se define como la multiplicación de las probabilidades asociadas a los aminoácidos que la componen por posición específica i (**Laplace, 1995; Feynman et al., 1964a; Mood., 1974; Blanco, 1996**).

$$P(S) = \prod_{i=1}^{20} P(A_i) \quad \text{Ecuación 3}$$

Entropía: En un sistema cuyos microestados no son equiprobables la entropía de un péptido está dada por:

$$S = k \sum_{i=1}^{20} P(A_i) \times \ln P(A_i) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde k es igual a la constante de Boltzmann, 1.38×10^{-23} (J/k), S el valor de la entropía (Tolman, 1979; Matvéev, 1987) y $P(A_i)$ es el valor de la probabilidad del aminoácido A en la posición i .

Metodología

Esta metodología está basada en un trabajo previo en donde se aplicó la teoría de la probabilidad y la entropía con el objetivo de caracterizar los péptidos de alta unión de la proteína de superficie de merozoito 1 (MSP-1), (Rodríguez, 2008a).

Se estudiaron las 25 secuencias sobrelapadas cada 10 aminoácidos de la proteína MSA-2, cada una con tamaño de 20 residuos, de las cuales 3 son comprobadas experimentalmente de alta unión (Ocampo *et al.*, 2000), tabla 1, la proteína completa fue escogida con el fin de caracterizar matemáticamente los dos macroestados, ver definiciones, de forma general y construir un espacio de probabilidad no equiprobable que cuantifique las secuencias de alta unión.

Posteriormente se calculó la frecuencia de aparición de cada uno de los 20 aminoácidos en cada una de las 20 posiciones para los péptidos comprobados experimentalmente de alta unión en cada proteína; con estos valores se calculó la probabilidad de aparición de cada uno de los 20 aminoácidos en cada posición, a través del cálculo de la probabilidad Laplaciana, Ecuación 1, con este cálculo se

obtiene el espacio de probabilidad total para el macroestado unión, el cual cuantifica la posibilidad de aparición de cada uno de los 20 aminoácidos en cada una de las 20 posiciones para las secuencias comprobadas experimentalmente de alta unión (Ocampo *et al.*, 2000).

Posteriormente se realizaron los cálculos de la sumatoria de probabilidad, Ecuación 2, probabilidad, Ecuación 3 y la entropía, Ecuación 4, para cada una de las 25 secuencias de la proteína MSA-2, partiendo de los valores del espacio de probabilidad.

Resultados

Para las secuencias asociadas al macroestado unión se encontró que las frecuencias de aparición para los veinte aminoácidos en todas las posiciones varió entre 0 y 12, estos valores corresponden a los aminoácidos W, L, D, C y N respectivamente. Las posiciones con mayor número de repeticiones de un mismo aminoácido fueron 2, 3, 5, 6, 9 y 14 correspondientes a los aminoácidos N, N, K, N, T, y A respectivamente. (Tabla 2)

Para las secuencias asociadas al macroestado unión los valores de la probabilidad Laplaciana por posición para los veinte aminoácidos esenciales variaron en un rango de 0 a 0,033, siendo el valor máximo el de N en las posiciones 2, 3 y 6, K en la posición 5, T en la posición 9 y A en la posición 14, encontrando 350 posiciones con un valor igual a cero de las 400 totales. (Tabla 3).

Tabla 1. Péptidos de la proteína MSA-2 estudiados en un trabajo previo (Ocampo *et al.*, 2000) y usados en el trabajo actual, los péptidos con AU en paréntesis son aquellos que presentaron alta unión según los resultados experimentales

MKVIKTLIINFFIFVTFNY	NQANKETQNNVQQDSQTK
NFFIFVTFNIKNESKYSNTF	SNVQQDSQTKSNVPPTQDAD
KNESKYSNTFINNAYNMSIR (AU)	SNVPPTQDADTKSPTAQPEQ
INNAYNMSIRRSMAESKPPT (AU)	TKSPTAQPEQAENSAPTAEQ
RSMAESKPPTGTGGSGSAGS	AENSAPTAEQTESPELQSAP
GTGGSGSAGSGAGASAGNGA	TESPELQSAPENKGTGQHG
GAGASAGNGANPGADAERSP	ENKGTGQHGHHMHSRNNHPQ
NPGADAERSPSPTAPPATPA	MHSRNNHPQNTSDSQKECT
SPTAPPATPATTTTTTTTND	NTSDSQKECTDGNKENCAGAA
TTTTTTTTNDAEASTSTSSE	DGNKENCAGAAATSLNNSSNY
AEASTSTSSENPNHKNAETN	TSLNNSSNIASINKFVVLY
NPNHKNAETNPKGKGEVQKP (AU)	ASINKFVVLYSATLVLSFAI
PKGKGEVQKPNQANKETQNN	

Tabla 2. frecuencias de aparición de los 20 aminoácidos esenciales por posición del macroestado unión. Los espacios en blanco corresponden a frecuencias de aparición igual a cero

MSA-2	W	F	Y	I	L	M	V	D	E	R	H	K	P	G	Q	S	T	C	N	A
1				1								1							1	
2													1							2
3									1											2
4											1					1				1
5			1									2								
6			1																	2
7						1										1				1
8									1							1			1	
9				1													2			
10		1								1									1	
11				1						1			1							
12												1				1			1	
13						1								1					1	
14												1								2
15			1						1					1						
16									1							1			1	
17						1	1					1								
18													1		1	1				
19				1								1	1							
20										1			1				1			
TOTAL	0	1	3	4	0	3	1	0	4	3	1	7	5	2	1	6	3	0	12	4

Para las secuencias específicas asociadas al macroestado unión los valores de Probabilidad fueron de $4,38E-35$, los de Sumatoria de Probabilidad $0,400$ y los de Entropía $2,13E-23$, y para las secuencias específicas asociadas al macroestado no unión los valores de Probabilidad variaron entre $5,14E-84$ y $1,67E-97$, Sumatoria de Probabilidad entre $0,117$ y $0,017$ y Entropía entre $5,98E-24$ y $9,72E-25$, Tabla 4.

Se encontró que los valores de Probabilidad, Sumatoria de Probabilidad y Entropía para las secuencias específicas comprobadas experimentalmente de alta unión varían entre los rangos asociados al macroestado unión, mientras que por lo menos uno de los valores (sumatoria de probabilidad, probabilidad o entropía) para los péptidos comprobados de no unión o baja unión se encuentran fuera de los rangos asociados al macroestado de unión. Es decir que los péptidos que presentaron valores de alta actividad de unión según el estudio químico previo (**Ocampo et al.**, 2000), presentan valores matemáticos de probabilidad,

sumatoria de probabilidad y entropía completamente diferenciados de aquellos péptidos que no presentaron alta actividad de unión.

Discusión

Este es el primer trabajo en el que a partir de dos leyes se caracteriza el fenómeno de unión para la proteína MSA-2. La caracterización desarrollada revela un orden matemático en el fenómeno de unión de péptidos a los receptores del eritrocito. La distribución no equiprobable, evidenciada al encontrar 350 posiciones con un valor a cero en el cálculo del espacio de probabilidad asociado al macroestado unión de las 400 posibles, muestra un orden comprensible a través de la teoría de la probabilidad.

Los rangos asociados a cada macroestado así como un espacio finito que contiene la totalidad de los péptidos y que es no equiprobable permiten caracterizar de manera física y matemática cuales son las secuencias que presen-

Tabla 3. Cálculos de la probabilidad Laplaciana para los 20 aminoácidos esenciales por posición del macroestado unión.
Los espacios en blanco corresponden a probabilidad igual a cero

MSA-2	W	F	Y	I	L	M	V	D	E	R
1				0,017						
2										
3									0,017	
4										
5			0,017							
6			0,017							
7						0,017				
8									0,017	
9				0,017						
10		0,017								0,017
11				0,017						0,017
12										
13						0,017				
14										
15			0,017						0,017	
16									0,017	
17						0,017	0,017			
18										
19				0,017						
20										0,017
TOTAL	0	0,02	0,05	0,07	0	0,05	0,02	0	0,07	0,05
MSA-2	H	K	P	G	Q	S	T	C	N	A
1		0,017							0,017	
2			0,017						0,033	
3									0,033	
4	0,017					0,017				0,017
5		0,033								
6									0,033	
7						0,017				0,017
8						0,017			0,017	
9							0,033			
10									0,017	
11			0,017							
12		0,017				0,017			0,017	
13				0,017					0,017	
14		0,017								0,033
15				0,017						
16						0,017			0,017	
17		0,017								
18			0,017		0,017	0,017				
19		0,017	0,017							
20			0,017				0,017			
TOTAL	0,02	0,12	0,08	0,03	0,02	0,1	0,05	0	0,2	0,07

Tabla 4. Valores máximos y mínimos de sumatoria de probabilidad, probabilidad y entropía para los macroestados de unión y no unión

PROTEÍNA: MSA2		Probabilidad	Sumatoria Probabilidad	Entropía
	MAX	4,38E-35	0,400	2,13E-23
MACROESTADO UNIÓN				
	MIN	4,38E-35	0,400	2,13E-23
	MAX	5,14E-84	0,117	5,98E-24
MACROESTADO NO UNIÓN				
	MIN	1,67E-97	0,017	9,72E-25

tan alta unión, encontrando una comprensión del fenómeno a partir de leyes físicas y matemáticas que permitiría mejorar las metodologías de ensayo error (Meister *et al.*, 1995) si se pudiera generar una predicción física de éste fenómeno, lo cual es el siguiente paso, siguiendo esta línea de trabajo, Rodríguez ha realizado varios trabajos aplicando teorías físicas y matemáticas para la comprensión de los fenómenos inmunológicos; calculó la dimensión fractal del repertorio inmune T y clones de células Th contra un alérgeno específico, el Poa P9, de un paciente alérgico (en presencia y ausencia de interferón alfa) evidenciando el comportamiento fractal de estos repertorios y el patrón Th y midiendo de forma objetiva y reproducible en inmunoterapias, encontrando correlaciones clínicas y matemáticas respecto a la salud y a la enfermedad (Rodríguez, 2005), desde la perspectiva de la teoría de conjuntos desarrolló un trabajo de péptidos de unión al HLA de clase II, encontrando un comportamiento caracterizable a partir de reglas halladas experimentalmente en péptidos no-naméricos específicos, logrando diferenciar péptidos de unión y no unión mediante operaciones matemáticas (Rodríguez, 2008b), con esta misma teoría, caracterizó el fenómeno de alta unión de la proteína de membrana MSP-1 al receptor de glóbulo rojo, encontrando órdenes matemáticos que diferencian los péptidos que presentan alta unión, de los péptidos que no, de forma objetiva y reproducible (Rodríguez, 2008c), finalmente basado en una teoría de predicción de unión de péptidos presentados por moléculas de HLA clase II basada en leyes de probabilidad, de combinatoria y de entropía (Rodríguez, 2008d), Rodríguez y cols. realizaron una predicción teórica de péptidos de unión del HER-2/neu y el API m1 a la molécula de HLA clase II (en proceso de revisión).

Actualmente los métodos de predicción de unión de péptidos utilizan metodologías computacionales que cuan-

tifican la unión, pero que se convierten en medidas que dependen del análisis usado y de la muestra de estudio y prueba, pues buscan combinar la información experimental disponible y junto con métodos de simulación computacional encontrar las relaciones, entre las secuencias de unión con ellas mismas y/o con las proteínas presentadoras (Zhao *et al.*, 2007, Lundegaard *et al.*, 2007), a diferencia de esos trabajos esta metodología parte de la construcción de un espacio de probabilidad y la posterior cuantificación de cada secuencia a partir de éste, con el objetivo de encontrar un orden físico y matemático subyacente a este fenómeno, donde se evalúa la totalidad del péptido respecto a una cuantificación matemática de todos los aminoácidos para todas las posiciones y donde no existen motivos que permitan distinguir si un péptido es de alta unión o no lo es.

La caracterización lograda permite encontrar órdenes simples e incontrovertibles, que parten de la aplicación de leyes de la naturaleza y de abstracciones que obvian la composición de las secuencias en términos de aminoácidos; pues el péptido es visto como una secuencia numérica de probabilidades y no de aminoácidos específicos. Este trabajo no pretende establecer las causas de que un péptido sea o no de alta unión, pues así como en las teorías fundamentales actuales de la física (Rañada, 1990) no hay causas para la descripción y comprensión de los fenómenos sino órdenes físicos y matemáticos acausales. Debido a que este trabajo es una caracterización física y matemática no requiere de análisis estadísticos ni del uso de grandes cantidades de datos experimentales.

Conclusiones

La distribución de los aminoácidos en las 20 posiciones para las secuencias asociadas al macroestado unión

presenta una distribución no equiprobable, la cual fundamenta la aplicación de las leyes de la probabilidad y de la entropía Boltzmann-Gibbs, permitiendo desarrollar una caracterización físico y matemática de las secuencias de alta unión de la MSA-2 basada en estas leyes.

Se encontró un orden físico y matemático subyacente al fenómeno estudiado que es evidenciado en las leyes, los cálculos aplicados, y las distribuciones de probabilidad, diferenciando claramente los péptidos de alta unión de los otros péptidos de la proteína, pues los valores de Probabilidad, Sumatoria de Probabilidad, y Entropía para las secuencias específicas comprobadas experimentalmente de alta unión varían entre los rangos asociados al macroestado unión, mientras que todos estos valores para las secuencias comprobadas de no unión se encuentran fuera de los rangos asociados al macroestado de unión.

La asociación de un microestado particular a la alta unión está asociada al valor de la probabilidad, de la suma de probabilidad y de la entropía del macroestado al que pertenece.

Bibliografía

- A. **Matvéev**. Física molecular, MIR, Moscú, 1987.
- A. **Mood**, **F. Graybill** y **D. Boes**. Introduction to the theory of statistics, 3rd Ed, Mc. Graw-Hill, Singapore, 1974.
- B. **Fenton**, **J.T. Clark**, **C.F. Wilson**, **J.F. McBride** y **D. Walliker**. Polymorphism of a 35±45 Kda Plasmodium falciparum merozoite surface antigen, *Mol. Biochem. Parasitol.* **34** (1989) 79-86.
- B. **Zhao**, **K. Sakharkar**, **C. Lim**, **P. Kanguane** y **M. Sakharkar**, MHC-Peptide binding prediction for epitopes based vaccine design, *IJIB* **2** (2007) 127-140.
- C. **Lundegaard**, **O. Lund**, **C. Kes**, **S. Brunak** y **M. Nielsen**. Modeling the adaptive immune system: predictions and simulations, *Bioinformatics* **23** (24) (2007) 3265-3275.
- E. **Froden** y **J. Royo**. Entropía e Información, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, in Internet: http://fisica.ciencias.uchile.cl/~gonzalo/cursos/termo_II-04/seminarios/alumnos/EntropiaInfo_Froden-Royo04.pdf
- F. **Rañada**. Orden y Caos, Introducción, Prensa científica, Barcelona, 1990.
- G.E. **Meister**, **Caroline G.P Roberts**, **Jay A. Berzofsky** y **Anne S. De Groot**. Two novel T cell epitope prediction algorithms based on MHC-binding motifs; comparison of predicted and published epitopes from Mycobacterium tuberculosis and HIV protein sequences, *Vaccine* (1995) Volume 13 Number 6, 581-591.
- H.A. **Stanley**, **R.F. Howard** y **R.T. Reese**. Recognition of a Mr 56K glycoprotein on the surface of Plasmodium falciparum merozoites by mouse monoclonal antibodies, *J. Immunol.* **134** (1985) 3439-3444.
- H.G. **Heidrich**, **W. Strych** y **J.E. Mrema**. Identification of surface and integral antigens from spontaneously released Plasmodium falciparum merozoites by radioiodination and metabolic labeling, *Z. Parasitenkd* **69** (1983) 715-725.
- _____, _____ y **P. Prehm**. Spontaneously released Plasmodium falciparum merozoites from culture possess glycoproteins, *Z. Parasitenkd.* **70** (1984) 747-751.
- J. **Rodríguez Velásquez**. Teoría de conjuntos aplicada a la caracterización matemática de unión de péptidos al HLA clase II, *Rev Cienc Salud* **1** (2008b) 9-15.
- J. **Rodríguez**. Caracterización física y matemática de péptidos de alta unión de MSP-1 mediante la aplicación de la teoría de la probabilidad y la entropía. *Archivos de Alergia e Inmunología Clínica* **39** (2008a) 2:74-82.
- _____. Comportamiento fractal del repertorio T específico contra el alérgeno Poa P9, *Rev. Fac. Med. Univ. Nac. Colomb.* **53** (2) (2005) 72-8.
- _____. Diferenciación matemática de péptidos de alta unión de MSP-1 mediante la aplicación de la teoría de conjuntos, *Inmunología* **27** (2) (2008c) 63-68.
- _____. Teoría de unión al HLA clase II, Teoría de la probabilidad combinatoria y entropía aplicadas a secuencias peptídicas, *Inmunología* **27** (4) (2008d) 151-166.
- J.A. **Lyon**, **A.W. Thomas**, **T. Hall** y **J.D. Chulay**. Specificities of antibodies that inhibit merozoite dispersal from malaria infected erythrocytes, *Mol. Biochem. Parasitol.* **36** (1989) 77-86.
- _____, **J.D. Haynes**, **C.L. Diggs**, **J.D. Chulay** y **J.M. Pratt-Rossiter**. Plasmodium falciparum antigens synthesized by schizonts and stabilized at the merozoite surface when schizonts mature in the presence of protease inhibitors, *J. Immunol.* **136** (1986) 2252-2257.
- J.T. **Clark**, **S. Donachie**, **R. Anand**, **C.F. Wilson**, **H.G. Heidrich** y **J.S. McBride**. 46 ± 53 Kilodalton glycoprotein from the surface of Plasmodium falciparum merozoites, *Mol. Biochem. Parasitol.* **32** (1989) 15-24.
- L. **Blanco**. Probabilidad, notas de clase, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Matemáticas y Estadística, 1996.
- M. **Aikawa**, **L.H. Miller**, **J. Johnson** y **J. Rabbege**. Erythrocyte entry by malarial parasites, *J. Cell. Biol.* (1978) 77-72.
- M. **Ocampo**, **M. Urquiza**, **F. Guzmán**, **L.E. Rodríguez**, **J. Suarez**, **H. Curtidor**, **J. Rosas**, **M. Diaz** y **M.E. Patarroyo**. Two MSA2 peptides that bind to human red blood cells are relevant to Plasmodium falciparum merozoite invasion, *J. Peptide Res.* **55** (2000) 216-223.
- P. **Laplace**. Ensayo filosófico sobre las probabilidades, Altaya, Barcelona, 1995.
- R. **Ramasamy**. Studies on glycoproteins in the human malaria parasite Plasmodium falciparum. Identification of a myristilated 45 Kda merozoite membrana glycoprotein. *Immunol. Cell. Biol.* **65** (1987) 419-424.
- R. **Tolman**, Principles of statistical mechanics, Dover, New York, 1979.

R.J. Epping, S.D. Goldstone, L.T. Ingram, et al. An epitope recognized by inhibitory monoclonal antibodies that react with a 51 kilodalton merozoite surface antigen in *Plasmodium falciparum*. *Mol. Biochem. Parasitol.* **28** (1988) 1-10.

R.P. Feynman, R.B. Leighton y M. Sands. Física, La teoría cinética de los gases, Vol. 1, Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, 1964b, pp. 39-1, 39-16.

_____, _____ y _____. Física, Leyes de la Termodinámica, Vol. 1, Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, 1964c, pp.44-1, 44-19.

_____, _____ y _____. Física, Probabilidad, Vol. 1, Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, 1964a, pp. 6-1, 6-16.

T.J. Hadley, F. W. Klotz, y L.H. Miller. Invasion of erythrocytes by malaria parasites: a cellular and molecular overview, *Ann. Rev. Microbiol.* (1986) 40:451.

World Health Organization, United Nations Children's Fund, World Malaria Report, Geneva, 20

Recibido: mayo 28 de 2009

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2009

ANÁLISIS CRÍTICO DEL PRINCIPIO DE UNIFORMISMO EN GEOLOGÍA, DESDE LA TEORÍA DEL CONOCIMIENTO DEL FILÓSOFO KARL RAIMUND POPPER

Por

Jesús Antonio Manrique Bonilla*

Resumen

Manrique Bonilla, J. A.: Análisis crítico del principio de uniformismo en geología, desde la teoría del conocimiento del filósofo Karl Raimund Popper. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **33** (129): 559-573, 2009. ISSN 0370-3908.

El uniformismo de James Hutton y Charles Lyell en geología, históricamente se ha considerado una noción confusa y poco creíble científicamente. A la vez, la mayoría de los análisis sobre este principio se sustentan desde un enfoque esencialmente inductivo, lo que, al parecer, es la razón por la que han resultado poco prometedores para su clarificación epistemológica. Sobre la hipótesis de que los problemas epistemológicos de este principio surgen de abordarlo como una generalización inductiva, aquí se intenta una interpretación distinta, basada no sólo en las afirmaciones de sus proponentes, sino también, en las ideas del filósofo K. R. Popper respecto a la insostenibilidad lógica de la inducción. En tal sentido, la aproximación al uniformismo desde el racionalismo crítico es novedosa respecto a las ya existentes. Desde esta visión, su validez, carácter y estatus epistemológico dejarán de ser confusos.

Palabras clave: a priori, conjetura, deducción, empírico, epistemología, geología, inducción, metafísico, principio de uniformidad de la naturaleza (PUN), uniformismo.

Abstract

The uniformitarianism of James Hutton and Charles Lyell in geology have been historically considered as a confuse and few credible notion, scientifically speaking. At the same time, most of the analysis about the uniformitarianism it is base on an essentially inductive focus, which apparently is the reason why they have result little promising for its epistemological clarification. Concerning the hypothesis that the epistemological issues of the uniformitarianism rise of thinking it like an inductive generalization, here it is attempted a different interpretation, not only based on

* Geólogo Magíster en Filosofía. Correo electrónico: jamanrique@correo.ingominas.gov.co; cuestorjesus@yahoo.com.mx

affirmations of its proposers but also in the ideas of the philosopher K. R. Popper about the logical unsustained of the induction. In that way, the approximation to the uniformitarianism since the critical rationalism is a novelty proposal to the already existent. From this vision, its validity, character and epistemological status will stop being confused.

Key words: a priori, conjecture, deduction, empirical, epistemology, geology, induction, metaphysics, principle of uniformity of nature (PUN), uniformitarianism.

1. Introducción

En 1780 se sabía muy poco de los procesos que condicionaban la dinámica terrestre. La asunción por parte de James Hutton y Charles Lyell del principio de uniformidad de la naturaleza (PUN) como punto de partida metodológico para la interpretación de los fenómenos geológicos (uniformismo), junto con algunos modelos explicativos sobre éstos, dieron lugar al primer esquema teórico que permitió, en gran medida el desarrollo científico de la geología por más de siglo y medio. A pesar de que Hutton y Lyell usaron el PUN esencialmente como una conjetura para explicar racionalmente la dinámica terrestre, insistieron en considerarlo una conclusión inductiva, cosa que también hicieron la mayoría de sus seguidores y críticos, dando origen desde el comienzo a una confusión epistemológica. Por otra parte, los autores también emplearon este principio para referirse a procesos o para hacer afirmaciones sustantivas sobre el mundo, introduciendo de este modo un uso diferente al estrictamente metodológico, que se utiliza para el logro de inferencias científicas. Semejante polisemia aumentó la dosis de confusión sobre la naturaleza epistemológica de este principio. Por razones como estas y a pesar de su gran poder heurístico, lo que se conoce como uniformismo se ha considerado una noción confusa y poco creíble como principio científico. Sin embargo, a pesar de de sus limitaciones metodológicas, el uniformismo ha sido fundamental en la reconstrucción de la historia de la tierra y en la evolución de la geología como ciencia, asunto que en términos prácticos demanda una buena comprensión epistemológica de sus implicaciones.

La visión inductivista del uniformismo en general es aceptada como cierta. Se cree que este principio es una inferencia obtenida a través de la experiencia repetida de muchos casos, los cuales además la justifican como verdadera, permitiéndole ser la base de las conclusiones o explicaciones geológicas. Por ser el número de casos justificadores siempre limitado, se necesita otro principio para justificarlo, el cual a la vez debe ser justificado, y así *ad infinitum*. Dado que esta situación es insostenible desde el punto de vista lógico y racional para la ciencia

empírica, el carácter científico del principio de uniformidad de la naturaleza y del uniformismo queda sin piso, y por supuesto la posibilidad de que se pueda justificar cualquier teoría o explicación científica que de ellos se derive. Esta propuesta es epistemológicamente problemática, no sólo por su injustificabilidad lógica, sino también por cierto sacrificio del empirismo pues el deseo de defender hasta el final la postura inductiva conduce a otorgar validez *a priori* al uniformismo (como ocurre, finalmente, con la misma inducción), en razón de las dificultades para sacar adelante una justificación genuinamente empírica o para establecer la verdad del uniformismo mediante recursos independientes.

En este trabajo se defiende la hipótesis según la cual la mayoría de los problemas epistemológicos del uniformismo provienen de interpretarlo como una inferencia inductiva. Se pretende mostrar que esta interpretación es la principal fuente de confusiones al respecto. El objetivo es desarrollar una interpretación no inductivista de este principio, teniendo en cuenta afirmaciones de sus mismos proponentes y argumentando desde las ideas del filósofo K. R. Popper la insostenibilidad lógica de la inducción y por tanto la de cualquier lectura del uniformismo desde esa perspectiva. Si esta tesis es correcta, será posible apelar a evidencia textual y análisis que permitan mostrar por qué, aunque algunos de sus proponentes expresaran que el PUN era inductivo, dicho principio en realidad no es más que una conjetura, como corresponde en la epistemología de Popper a un principio metafísico.

Popper, sobre la tesis de que todo conocimiento es conjetural, anula la necesidad de que éste se tenga que justificar, disuelve el problema de la inducción y le devuelve al empirismo un papel en el desarrollo del conocimiento científico, que no es el de originarlo ni el de fundamentarlo. Desde esta visión el PUN deja de ser inductivo y sobre el argumento de que es una aserción imposible de refutar empíricamente, plantea que éste principio es *a priori* y metafísico. En ese marco lo asume como una conjetura o hipótesis metafísica de trabajo, que les sirve a los científicos en su búsqueda de leyes. Al ser una conjetura no necesita ser justificada, y por ser metafísica no puede ser

refutada fácticamente. Además, toda explicación científica fáctica basada en el uniformismo tendría también carácter conjetural, por lo que en principio no necesitaría ser justificada. No obstante por su carácter fáctico podrá ser refutada o corroborada por los hechos, mas nunca verificada por ellos.

Como se hará evidente al lector, la mayoría de los análisis del uniformismo se han hecho históricamente desde un enfoque inductivo, lo que en opinión del autor, es la razón por la que han resultado poco prometedores para su clarificación epistemológica. En tal sentido, la aproximación al uniformismo desde un punto de vista no inductivo propio del racionalismo crítico, es una propuesta novedosa respecto a las ya existentes. A partir de esta visión se verá que algunos de sus problemas epistemológicos resultan sólo aparentes, mientras otros encuentran una solución sencilla y al final, su significado, validez y estatus como método de inferencia científica dejan de ser confusos.

De otro lado es importante decir que la geología es una ciencia descuidada por la filosofía. Al contrario de por ejemplo la física o la biología es difícil encontrar un tratado de filosofía de la geología. Al respecto vale la pena resaltar los esfuerzos de la Sociedad Geológica Americana y la Sociedad Geológica de Londres. En la filosofía de la geología, quizá el principio del Uniformismo es el aspecto más discutido, dada su importancia en el desarrollo de esta ciencia, pero sobre todo debido a la ambigüedad y confusión epistemológica que lo caracterizan. En la literatura se encuentran algunas ligeras referencias a la teoría del conocimiento del filósofo K. R. Popper para abordar aspectos epistemológicos del Uniformismo, pero en ningún caso se observa una aplicación tan específica de la filosofía de Popper al entendimiento epistemológico de este principio como el planteado en este trabajo, por lo que esta propuesta es totalmente novedosa en su visión y aportes a la clarificación del Uniformismo en particular y al desarrollo de la filosofía de la geología en general.

2. El problema de la inducción

Casi siempre se ha creído que el método de investigación en la ciencia empírica es inductivo, es decir, que la ciencia procede de las observaciones a las conclusiones o en otras palabras, cuando se obtiene una generalización científica (por ejemplo una teoría o una hipótesis) se supone que ésta sale de un número finito de observaciones. En estos casos se dice que se ha hecho una inferencia inductiva: una inferencia de lo observado (un grupo de casos) a lo no observado (todos los demás casos), o lo que es lo mismo, de lo particular a lo general, hasta lo

universal (inferencia ampliativa). Pero esto origina dificultades, pues un grupo finito de observaciones hacen creíble la conclusión pero no la hacen necesaria, lo cual no es aceptable desde el punto de vista lógico. Esto hace que los inductivistas se preocupen por encontrar una manera de “fundamentar o justificar” las generalizaciones científicas. Como dice **Popper (1996: 27)**: “La cuestión sobre cómo establecer la verdad de lo enunciados universales (hipótesis y teoría científicas) basados en la experiencia se conoce como el problema de la inducción.”

David Hume fue el primero en exponer tal dificultad. Él concluyó que las inferencias inductivas no se pueden justificar desde el punto de vista racional, lo que permite concluir que la inducción es inválida (**Popper en Miller, 1995: 116 y 121**). Según el análisis de Hume, quien insista en defender el carácter inductivo de la ciencia, quedará atrapado en el dilema de considerar esta realización humana como imposible o declarar que el conocimiento científico es irracional (**Popper en Miller, 1995: 121**).

La principal solución planteada por los inductivistas a este problema, considera que hay un principio de inducción que expresa algo como: “a partir de una cierta evidencia podemos sacar conclusiones que van más allá de ella”. Este principio contiene implícitamente la creencia de que el futuro será como el pasado (**Estany, 1993: 169**), es decir, presupone la uniformidad de la naturaleza. Como el principio de inducción para los inductivistas es empírico y el principio de uniformidad de la naturaleza (PUN) está implícito en él, entonces al justificar el primero quedaría justificado el segundo. Según **Martínez (1980)** los inductivistas asumen el principio de inducción como una premisa muy general, que supuestamente garantiza que hay leyes naturales cuya verdad nos consta; así se puede reducir la verdad de las leyes científicas a la verdad de ciertos enunciados singulares, los cuales por experiencia sabemos que son verdaderos. Por tanto, el procedimiento inductivo sería una subclase de los razonamientos deductivos, pero una vez se pregunta sobre su naturaleza y origen inmediatamente surgen problemas. Al respecto, según **Martínez (1980: 96)**, hay tres posibles respuestas:

- El principio de inducción es analítico: Las leyes universales deducidas lógicamente de éste serán verdades absolutas, tautologías (porque al ser analíticas prescinden de la experiencia), que dicen muy poco o nada de la realidad, aunque se cumplan en todos los mundos posibles.
- El principio de inducción es sintético a posteriori: Afirma algo del mundo real, pero su validez vendría garantizada por los datos experimentales, lo cual lle-

varía de nuevo al problema de justificar las generalizaciones inductivas que es lo que se quiere solucionar. En los argumentos demostrativos las premisas fundan la verdad de la conclusión, pero en este caso el mismo razonamiento no es capaz de demostrar la verdad de sus propias premisas, lo cual se tendría que hacer mediante otro razonamiento y éste a la vez mediante otro y así hasta el infinito.

- El principio de inducción es sintético a priori: Afirma algo del mundo real pero no es experimental. Esta es la propuesta de Kant quien consideraba también la validez a priori de este tipo de principios.

Como afirma **Popper (1996: 237)**, dado que la primera opción es inaceptable, porque no dice nada de la realidad, la aceptación de la inducción nos enfrenta al dilema de escoger entre una regresión al infinito o el apriorismo.

2.1. Solución de K. R. Popper al problema de la inducción

Sobre la hipótesis de que los problemas epistemológicos del uniformismo se originan esencialmente en creer que este es un principio empírico e inductivo, conviene buscar su clarificación en enfoques epistemológicos alternativos, como los que se encuentran en la filosofía popperiana, los cuales permiten sustentar una lectura diferente del PUN y por tanto del uniformismo.

Popper de plano rechaza la inducción por su injustificabilidad lógica. En **Miller (1995)** se lee que este filósofo plantea que el problema lógico de la inducción surge de: 1) el descubrimiento de Hume, de que es imposible justificar una ley mediante la observación o la experimentación, ya que “trasciende la experimentación”; 2) el hecho de que la ciencia propone y utiliza leyes “por todas partes y todo el tiempo”; 3) el principio del empirismo, que asevera que en la ciencia sólo la observación y la experimentación pueden decidir sobre la aceptación o el rechazo de los enunciados científicos, incluyendo las leyes y las teorías.

Ahora bien, estos tres puntos a primera vista chocan unos con otros y ese choque aparente origina el problema lógico de la inducción. Popper considera que los tres puntos expresados arriba no se oponen entre sí. Esto se entiende si se advierte que la aceptación de una teoría por parte de la ciencia es *sólo tentativa*, lo cual equivale a decir que todas las leyes y teorías son conjeturas o hipótesis tentativas; por tanto no se necesita fundamentar o justificar su verdad, pero si es posible rechazarlas a la luz de nuevas evidencias.

Como una teoría es tentativa y su aceptación o rechazo lo deciden la observación y la experimentación a partir de duras pruebas a las que debe ser sometida, entonces el empirismo logra mantenerse plenamente. Queda claro que una teoría nunca se infiere en ningún sentido de la observación o evidencia empírica. No existe la inducción de ningún tipo, por tanto no hay necesidad de justificar las supuestas inferencias inductivas. Sólo la falsedad de una teoría puede inferirse de la evidencia empírica, y esta inferencia es puramente deductiva. En resumen, de la observación no es posible inferir la verdad de una teoría pero sí su falsedad. Aceptar tal resultado aclara la relación entre teorías y observación (**Popper en Miller, 1995: 114 y 115**).

3. El Principio de Uniformidad de la Naturaleza (PUN) según Popper

Con el argumento de que el PUN es una aserción imposible de refutar empíricamente, Popper lo reduce a una conjetura metafísica *a priori* (pero no válida *a priori*, como creía Kant), que desempeña un papel metodológico en la búsqueda de leyes naturales, sin afirmar si en el mundo hay o no regularidades estrictas: “El futuro será en parte semejante al pasado y en parte en modo alguno, semejante al pasado” (**Popper, 1994: 194**). En el marco de esta respuesta, Popper asume que “La finalidad de la ciencia es la búsqueda de leyes universales y de un sistema teórico coherente, desde el que se pueda explicar cualquier tipo de eventos” (**Popper, 1996: 229**). Buscar leyes en el mundo, implica suponer que en éste hay regularidades. Pero afirmar enfáticamente que el mundo presenta regularidades, es una generalización metafísica dogmática, insostenible desde el punto de vista lógico. Para superar este problema, Popper asume que la búsqueda de leyes naturales implica de parte de los científicos una fe metafísica en la existencia de regularidades en el mundo; y expresa que comparte totalmente esa fe, porque sin ello es difícil concebir la actuación práctica (**Popper, 1996: 235**). Por tanto, la fe metafísica del científico en la uniformidad de la naturaleza le permite buscar leyes sin recurrir a enunciados especulativos y dogmáticos sobre el mundo. Se trata de una fe metafísica que no es enunciativa (no afirma la existencia de regularidades) sino propositiva (las busca). Para Popper el PUN no es un principio empírico basado en la lógica inductiva, pues apelar en la búsqueda de explicaciones científicas (leyes) a una lógica que nadie ha podido caracterizar debidamente, nos llevaría, como ya se mostró, a una regresión al infinito o al apriorismo.

Pero Popper no se queda allí. Él plantea que metodológicamente, cada vez que se logra un sistema nuevo de hipótesis, éste debe explicar las regularidades ya conoci-

das; esta regla, dice, contiene el principio de uniformidad de la naturaleza. Por ejemplo, si una regularidad cotidiana de repente no ocurriera (digamos que el sol no saliera mañana), las teorías científicas que se propusieran para explicarlo, tendrían que ser capaces de explicar no sólo este hecho nuevo, sino todos los hechos conocidos anteriormente. Desde este punto de vista se puede ver que el PUN (el cual expresa que en el mundo hay regularidades) puede ser reemplazado o reducido al postulado de la “invariancia en el tiempo y en el espacio de las leyes naturales”. Por tanto se debe entender que las regularidades que se observan en un momento dado en el mundo pueden cambiar, pero asumimos que es parte de nuestra definición de las leyes naturales postular que éstas son invariantes en el espacio y el tiempo; lo cual desde el punto de vista metodológico no afirma nada categórico sobre el mundo, sólo estipula una característica que es parte de nuestra definición de ley natural (**Popper, 1996: 236**).

De esta manera se reduce el principio de uniformidad de la naturaleza al postulado de la invariancia de las leyes naturales en el tiempo y el espacio. Queda claro que cualquier regularidad observable puede cambiar, por lo que no se debe asumir ninguna como un juicio metodológico para explicar el mundo (como las regularidades transitorias que involucra la uniformidad de procesos), pero las leyes naturales por definición y por método si se pueden asumir como invariantes; con ello no se afirma nada categórico del mundo, pues esta afirmación solo se refiere a una característica epistemológica de ellas.

Por las razones anteriores, sugiero que la idea de la uniformidad de la naturaleza, usada por Hutton y Lyell como principio de inferencia para explicar la dinámica terrestre, se plantee como el postulado metodológico de “uniformidad o invariancia de las leyes en el tiempo y el espacio”. Este planteamiento, anula de un lado la posibilidad de aplicar el PUN con más de un sentido de uniformidad y del otro, le devuelve al empirismo su función ya que las explicaciones que de él se derivan se refieren al mundo y por tanto pueden ser corroboradas o rechazadas por los hechos. Cualquier otra manera de aplicar este recurso, limitándolo a procesos, estados o ritmos, conlleva un uso deflacionario de la noción de uniformidad.

4. Visión Inductivista del PUN y su aplicación en Geología (El Uniformismo)

Proponentes e intérpretes del PUN parecen considerar que éste es de naturaleza fundamentalmente inductiva y

que en consecuencia, las inferencias que se basan en su aplicación comparten tal estatus. Apelando a la evidencia textual y al análisis se mostrará por qué, aunque sus proponentes expresaron que el PUN era inductivo, éste es sólo una conjetura que corresponde, en la epistemología de Popper, a un principio metafísico. Se abordará este problema, comenzando por los textos que apoyan el inductivismo, para concluir con la tesis contraria que ya se ha anunciado.

4.1. Ejemplos de expresiones inductivistas en Hutton y Lyell

En varias ocasiones Hutton argumenta su propuesta así como sus métodos de análisis desde una visión inductivista. Por ejemplo, al referirse al entendimiento general de la tierra afirma:

Si buscando este objeto empleamos nuestra habilidad en la investigación, no haciendo vanas conjeturas; y si se han de encontrar datos sobre los cuales la Ciencia puede formular conclusiones adecuadas, no permaneceremos mucho tiempo en la ignorancia con respecto a la historia natural de esta tierra... (**Hutton, 1785: 4**).

Hutton rechaza el método deductivo de la conjetura y muestra como camino, la consecución de datos para extraer las conclusiones científicas, es decir, aconseja seguir el método inductivo para clarificar la historia natural de la tierra. Posteriormente expresa: “Si examinamos las cosas actuales, tenemos datos a partir de los cuales podemos razonar sobre lo que fue, y a partir de lo que ya fue, tenemos datos para sacar conclusiones sobre lo que ocurrirá aquí más adelante”. Y luego dice: “En lo que sigue, por tanto, examinamos la construcción de la tierra presente para entender las operaciones de la naturaleza en épocas pasadas, y así adquirir principios con los que podemos concluir respecto al futuro curso de las cosas...” (**Hutton, 1785: 6**).¹ Obsérvese que la segunda parte de cada afirmación tiene un tono claramente inductivo, el autor asume que se pueden lograr conclusiones sobre el futuro y sobre el pasado, sólo a partir de observaciones en el presente, que funcionan como el punto de partida de ciertas generalizaciones. Refiriéndose a la conexión causa-efecto dice:

Pero si siempre fuera necesario ver esta conexión inmediata, para reconocer en el efecto la operación de una fuerza la cual en el presente está extinguida, perderíamos los beneficios de la ciencia o principios generales, desde donde los particulares pueden ser

¹ Hutton con “las apariencias” se refiere a los fenómenos.

deducidos, y no seríamos capaces de razonar mejor que el bruto. Razonando a partir de las apariencias, las cuales son particulares, debemos ser cuidadosos de la manera como generalizamos; debemos ser cautos de no atribuir a la naturaleza leyes que puedan ser sólo de nuestra propia invención (**Hutton, 1785: 38**).

Hutton, tal vez en la línea argumentativa de Newton, sugiere que es posible remontarse de los efectos a las causas, aplicando un supuesto método inductivo que permite alcanzar principios generales (leyes), a partir de los cuales se haría deducción. Luego continúa argumentando con un razonamiento inductivista.

Como Hutton, Lyell hace afirmaciones inductivistas para explicar la dinámica terrestre. Por ejemplo, al referirse a las interpretaciones de los primeros observadores dice que en la medida en que aumentan las observaciones se logran interpretaciones más acertadas, lo que a la vez permite inducir la uniformidad de los eventos físicos (**Lyell, 1830: vol. I, cap. V, pag. 75**). Lyell, en una actitud claramente inductivista basa el grado de acierto de las interpretaciones en el mayor número de datos y plantea la uniformidad de los eventos físicos como algo inducido.

Al objetar el cambio sucesivo de los seres vivos a través del tiempo y el origen del hombre por este proceso Lyell expresa:

Debemos guiarnos por las mismas reglas de la inducción como cuando especulamos sobre el estado de América en el intervalo que transcurrió entre el período de la introducción del hombre en Asia, la cuna de nuestra raza, y el del arribo de los primeros aventureros a las costas del Nuevo Mundo (**Lyell, 1830: vol. I, cap. IX, pag. 158**).

Hace una clara invitación a la inducción; que inclusive propone extender al ámbito de la especulación teórica. Lo anterior sugiere que Lyell no tiene claro cuándo se está haciendo uso del método deductivo (tras las conjeturas del caso) en el análisis de un asunto, y cuándo se aplica el supuesto principio de inducción. Posteriormente afirma:

Pero si en vez de invertir el orden natural de indagación, procedemos en nuestra investigación cautelosamente, *desde lo conocido a lo desconocido*, y empezamos estudiando los periodos más modernos de la historia de la tierra, luego intentamos descifrar los monumentos de cambios más antiguos, así nunca podemos perder de vista la analogía, como para temer que hemos arribado a un nuevo sistema, gobernado por leyes físicas diferentes (**Lyell, 1830: vol. I, cap. IX, pag. 160**).

Desde lo conocido se infiere lo desconocido, presupuesto inductivo sugerido por Lyell para inferir el pasado como alternativa a la actitud especulativa de otros. **Lyell (1830: vol. I, cap. IX, pag. 164)** hace la declaración inductivista más nítida cuando aborda el problema de la confianza que se debe tener en la permanencia de las leyes naturales:

Su inmutable constancia sólo puede permitirnos razonar desde la analogía, por las estrictas reglas de la inducción, respecto a eventos de épocas anteriores, o comparando el estado de las cosas en dos épocas geológicas distintas, para llegar al conocimiento de principios generales en el funcionamiento de nuestro sistema terrestre.

La inmutabilidad de las leyes es la clave para hacer inferencias inductivas sobre el pasado o el futuro terrestre, a partir de las observaciones del presente. Pero el argumento, al menos como lo presenta Lyell, parece ser circular, pues la inmutabilidad de las leyes permite hacer inferencias inductivas y éstas a su vez permiten llegar al conocimiento de principios generales, es decir de las leyes.

Como se ve, Hutton y Lyell se declaran inductivistas y partidarios de aplicar de manera constante un principio de inducción que permita obtener reglas generales (leyes) acerca del funcionamiento del sistema terrestre.

4.2. Ejemplos de expresiones inductivistas de algunos lectores y críticos

Teniendo en cuenta la popularidad de la visión inductivista de la ciencia por los éxitos de la física de Newton, no sorprende que la mayoría de lectores y críticos del uniformismo de Hutton y Lyell sean inductivistas. Por tanto, es normal que ellos consideren el uniformismo una generalización inductiva y las conclusiones derivadas de él como el resultado de la toma de innumerables observaciones de campo o de laboratorio. Se exponen a continuación afirmaciones de varios intérpretes, algunos de ellos autores de textos de geología básica, que se refieren a Hutton y Lyell como investigadores de corte claramente inductivista.

A. Geikie (1905 en Gould, 1992: 86) sobre Hutton afirma: “En toda la doctrina, Hutton se cuidó de admitir cualquier principio que no pudiera ser encontrado por medio de la observación”. Parece que para Geikie la consecución de principios sólo puede hacerse mediante la observación. Si es así, tanto el sistema teórico como las explicaciones del sistema terrestre que nos legó Hutton serían inductivos.

W. D. Thornbury (1960: 7) expresa sobre Hutton que él “proyectó tanto al pasado como al futuro los resultados de los procesos que observó en acción”. De nuevo, una apreciación inductivista. Según Thornbury, Hutton hizo inferencias sobre el pasado y sobre el futuro a partir de un puñado de observaciones. En su visión está la esencia de la aplicación del principio de uniformidad en geología (uniformismo) como lo entienden los inductivistas.

M. K. Hubbert (1967: 29) en su discusión sobre el grado de validez del principio de uniformidad, refiriéndose a una expresión muy repetida por Lyell, afirma:

Este primer postulado del principio de uniformidad, que determina que las leyes de la naturaleza son invariables en el tiempo, no es sólo aplicable a la geología, sino que es un común denominador para la ciencia. En efecto, en lugar de ser una asunción o una hipótesis *ad hoc* es simplemente un resumen sucinto de la totalidad de las evidencias observacionales y experimentales.

En otras palabras, Hubbert piensa que es a partir de las observaciones que se ha concluido que las leyes de la naturaleza son invariables, y por tanto, que el principio sobre la uniformidad de las leyes es una conclusión empírica e inductiva.

A. Holmes (1980: 32, 75 y 103) al elogiar la obra de Hutton dice: “Él se dio cuenta con la claridad de un genio que la historia del pasado de nuestro globo se debe explicar por lo que se ve que está ocurriendo hoy”. Un poco más adelante agrega: “insistió en que las vías y significado de la naturaleza sólo podrían descubrirse por observación.” Al decir que el pasado se debe explicar por lo que se ve que está ocurriendo hoy y que la naturaleza sólo se descubre por la observación, Holmes asume que Hutton en sus explicaciones siguió el método inductivo. No obstante lo anterior Holmes (página 75) afirma: “Hutton, creyendo que el granito debía ser la causa de la formación de cordilleras montañosas, intentó confirmar o desechar ésta hipótesis. En 1789 examinó los afloramientos de granito del norte de Glenn Tilt (...)”, luego relata las observaciones que hizo Hutton al respecto y que confirmaron su creencia. A partir de esta afirmación se puede pensar que Hutton no fue inductivista, sino deductivista; no infirió sus teorías de las observaciones, sino que las propuso a manera de hipótesis y con la evidencia empírica intentó

establecer² su verdad o falsedad, a partir de lo cual las rechazaba o aceptaba. La plausibilidad de esta interpretación va en contravía de las anteriores afirmaciones del profesor Holmes, y vislumbra un poco la ilusión perceptiva que le da origen a la inducción y a la creencia de que ésta es la fuente del conocimiento científico.

Tarback & Lutgens (1999: 2 y 3) refiriéndose al origen de la geología moderna señalan:

(...) Hutton estableció un principio que acabó por conocerse como la doctrina del **uniformismo**. El uniformismo es un principio fundamental de la geología moderna. Establece simplemente que las *leyes físicas, químicas y biológicas que actúan hoy, lo han hecho también en el pasado geológico*. Esto significa que las fuerzas y los procesos que en la actualidad observamos que dan forma a nuestro planeta actuaron también en el pasado. Por tanto, para comprender las rocas antiguas, debemos entender primero los procesos petrogénicos y sus resultados en la actualidad.

Los autores dan una definición del uniformismo acorde al postulado de la invariancia de las leyes naturales, lo cual no tiene problemas epistemológicos. Pero luego reducen este postulado al enunciado actualista; es decir, pretenden llegar a la invariancia de los procesos y fuerzas geológicas a partir de la invariancia de las leyes. El Actualismo como se verá, es una afirmación fáctica ya refutada, mientras el Uniformismo es una presunción metafísica que no dice nada sustantivo sobre el mundo, por tanto no puede ser reducida a afirmaciones fácticas.

Un filósofo que se ocupa del principio de uniformidad y su uso en geología es Nelson Goodman, quien en su ensayo “*Uniformity and Simplicity*” (1967), examina lo que considera el carácter ambiguo, confuso y la insostenibilidad fáctica de dicho principio. Propone como primer paso hacia la clarificación del PUN su conversión en un principio de simplicidad. Al plantear la insostenibilidad fáctica del principio de uniformidad, lo asume implícitamente como un principio empírico e inductivo. Si lo dicho es correcto, este hecho es razón suficiente para dudar de sus conclusiones. No obstante, también es posible contra argumentar a Goodman (páginas 93 y 94) desde otros aspectos. Él comienza presentando las maneras como considera se entiende el PUN, a saber:

² En sentido estricto no es posible “establecer” la verdad de una hipótesis apelando a ninguna cantidad de evidencia empírica, pero como estamos examinando la plausibilidad de una lectura no inductivista del principio de uniformidad, y Hutton no era precisamente un popperiano, podemos tomarnos ciertas libertades de redacción para contextualizar mejor el problema.

- Como una creencia indispensable acerca del mundo, con la que se asume la negación de cualquier cambio drástico o súbito.
- Como una afirmación que considera que cualquier cambio por violento que sea, siempre es el resultado de procesos subyacentes y graduales.
- Como una afirmación sobre la constancia de las leyes.

Luego de refutar estas visiones de uniformidad concluye: “la uniformidad requerida no está en las actividades de la naturaleza sino en nuestra explicación de ellas” (Goodman, 1967: 94). El problema de esta afirmación es su notable tono instrumentalista y anti-realista. Por otra parte, si se trata de identificar la uniformidad como un componente del mundo físico o del espacio lógico, la conclusión de Goodman tampoco parece ser correcta. Incluso se puede pensar que la uniformidad no está en ninguna parte, ni en el mundo ni en nuestras explicaciones de él. No está en el mundo porque lo que el principio implica es una suposición sobre la naturaleza de las leyes físicas, útil para la ciencia; y no está en las explicaciones, porque se puede decir que éstas son precisamente las que sugieren que la uniformidad es una posibilidad que nos permite entender mejor el estado de cosas. La afirmación de Goodman refuerza la creencia en el carácter empírico que los inductivistas dan a la uniformidad, cuando el problema radica precisamente en que el PUN no puede ser explicado o justificado inductivamente, porque la inducción no es justificable lógicamente, ni sus métodos capaces de establecer conclusiones ciertas. Por tanto, aquí se considera que el análisis de Goodman en los anteriores aspectos (la creencia de que la uniformidad forma parte integral de nuestras explicaciones y la idea de reducir la uniformidad al principio de simplicidad) es equivocado. Por esta razón, se conjetura que la clarificación de la naturaleza epistemológica del PUN no empieza cuando se le reduce al principio de simplicidad, sino cuando se asume (en la línea de Popper) que todo conocimiento científico es tentativo; suposición que aunada al rechazo de la inducción nos ayuda a entender mejor las razones por las que el PUN (desde el punto de vista ontológico) no puede ser inductivo ni empírico, sino sólo una suposición metafísica útil para la ciencia.

5. Visión no inductivista del PUN y su aplicación en geología (El uniformismo)

A continuación se muestra evidencia textual de que, pese a sus repetidas expresiones, Hutton y Lyell eran conscientes de que utilizaban el PUN más como una conjetura o hipótesis de trabajo que como una generalización

inductiva y de que su argumentación no es inductiva a pesar de que así lo afirmen.

5.1. Ejemplos de Expresiones no inductivista del PUN en Hutton y Lyell

Hutton constantemente apela al PUN como una conjetura que metodológicamente se puede usar para explicar la dinámica terrestre. Sin embargo, hay cierta tensión entre este uso conjetural del principio y sus continuas advertencias contra la idea de acudir a conjeturas para tratar de explicar el mundo. Esta tensión puede resolverse si interpretamos la advertencia de Hutton contra las “conjeturas vanas” como una advertencia en contra de las especulaciones infundadas, por contraste con las conjeturas que tienen algún tipo de relación con los hechos, y que a él le parecen instancias legítimas de inducción. El punto es que resulta posible interpretar estas últimas en el sentido de las conjeturas popperianas, es decir, como conjeturas que hacemos con la intención de ponerlas a prueba contra los hechos y ajustar nuestras explicaciones de conformidad. Hutton argumenta la necesidad de *suponer* la uniformidad de la naturaleza, por ejemplo, luego de encomiar los procedimientos inductivos afirma:

Por consiguiente, *partiendo de la suposición* de que las operaciones de la naturaleza son uniformes y constantes, encontramos en las apariencias naturales medios para concluir que transcurrió necesariamente una cierta porción de tiempo en la producción de aquellos acontecimientos de los que hoy vemos sus efectos (Hutton, 1785: 6).

Es perfectamente posible interpretar la expresión en cursiva como indicadora del carácter conjetural que le atribuye al principio de uniformidad y su valor para lograr ciertas conclusiones, en este caso, la de hacer evidente el transcurrir del tiempo en los procesos geológicos. Al referirse a las operaciones de consolidación de los estratos Hutton dice:

(...) habría cierta uniformidad observable en los efectos y habría leyes generales por las cuales estas operaciones deben haber sido conducidas. Además conociendo estas leyes generales y haciendo observaciones apropiadas con respecto a las apariencias naturales de esas masas consolidadas, un filósofo en su estudio, podría ser capaz de determinar qué puede y qué no puede haber sucedido en las entrañas de la tierra...(Hutton, 1785: 11).

En la primera parte del texto, Hutton hace una suposición explícita sobre la uniformidad en los efectos y una suposición implícita sobre la existencia de leyes genera-

les. En la segunda parte, en términos generales esboza el método deductivo y le otorga una apropiada función a la observación, al ponerla como juez de las conclusiones que se hagan sobre la dinámica terrestre. En otro fragmento se lee:

Hemos representado el sistema de la tierra *como si éste procediera con cierta regularidad*, la cual, tal vez no está en la naturaleza, pero la cual es necesaria para nuestra clara concepción del sistema natural. El sistema de la naturaleza está ciertamente en regla, aunque ahora podemos saber cada circunstancia de su regulación. *Por tanto, estamos bajo la necesidad de hacer suposiciones regulares*, para llegar a ciertas conclusiones, las cuales pueden ser comparadas con el actual estado de las cosas (**Hutton, 1785: 54**).

En la primera frase, Hutton expresa claramente que su método se basa en la suposición de la uniformidad de la naturaleza, y afirma que esta premisa es necesaria para entender el mundo. No cae en afirmaciones categóricas o dogmáticas acerca de si el mundo contiene regularidades. La última parte de la cita es especialmente importante, porque en ella claramente traza el método deductivista que aplica en su teoría de la tierra. Veamos: Primero dice que es necesario suponer la regularidad de la naturaleza, planteamiento que podemos interpretar como la expresión de una posición conjetural de tipo metodológico, expresada en una fe metafísica que permite la búsqueda de leyes. Luego declara que estas “*suposiciones*” se necesitan para “llegar a ciertas conclusiones”, lo cual es lo mismo que decir que la conjetura puede generar otras conjeturas más arriesgadas (ciertas generalizaciones o leyes naturales). Finalmente afirma que estas generalizaciones pueden ser contrastadas con los hechos.

Creo que aquí está sintetizada de manera nítida una anticipación a las ideas sobre la dinámica de la investigación científica que propone Popper: la de hacer conjeturas sobre el mundo y luego tratar de refutarlas al contrastarlas con los hechos y la experimentación, todo sobre la suposición de que la naturaleza es uniforme. Luego de declarar que la destrucción de un continente y la formación de otro es un fenómeno paulatino o progresivo Hutton afirma:

En el logro de un cierto fin, no estamos limitando la naturaleza con la uniformidad de una progresión constante; aunque es necesario en nuestros cálculos proceder sobre igualdades (**Hutton, 1785: 55**).

Con la frase “el logro de un cierto fin” Hutton se refiere al intento de explicar la dinámica terrestre, y con la expresión “no estamos limitando la naturaleza (...)” deja entre-

ver que para él, en este intento, la uniformidad no es necesariamente un hecho, sino más bien una suposición. Luego Hutton es explícito en mostrar que la necesidad de proceder sobre igualdades es metodológicamente necesaria.

Lo expuesto revela la verdadera naturaleza epistemológica de los argumentos de Hutton en su obra “*Teoría de la Tierra*”. Como para ello fue fundamental la idea de la uniformidad de la naturaleza, y dado que ésta se ha considerado una inferencia inductiva, incluso por Hutton, estos ejemplos y los análisis presentados en este artículo contribuyen a revelar la confusión que afecta la naturaleza epistemológica del uniformismo desde sus orígenes. Es razonable defender una interpretación como la que se propone aquí, según la cual Hutton usó el PUN como una conjetura metodológica para hacer inferencias deductivas sobre la dinámica terrestre. No sobra aclarar, que es más fácil encontrar en su obra ejemplos numerosos y claros de deductivismo, lo cual resulta dañino para la interpretación tradicional que ve a Hutton como un científico inductivista.

Al igual que Hutton, Lyell trató con frecuencia el principio de uniformidad como una conjetura metodológicamente necesaria para explicar el sistema terrestre y no como el resultado de una generalización inductiva. Por ejemplo, refiriéndose a los huttonianos dice:

Si ellos se esforzaron explicando el origen de ciertas rocas ígneas, o explicando las fuerzas que elevaron colinas o excavaron valles, o las causas que llevaron a la extinción de ciertas razas de animales, fue porque primero presupusieron un original y similar orden de la naturaleza.

Y luego señala:

Los huttonianos fueron concientes de que sin comprobación podrían inclinarse demasiado hacia la conjetura, especulando las causas de los fenómenos geológicos, a no ser que podamos asumir la constancia invariable en el orden de la naturaleza (**Lyell, 1830: vol. I, cap. V, pág. 86**).

Estas citas definen claramente que Lyell entendió el empleo del principio de uniformidad como una conjetura metodológica para poder lograr ciertas explicaciones de los hechos geológicos. Cuando trata la influencia de las causas inorgánicas en la distribución de las especies dice:

Esta observación nos conduce a señalar una de las más interesantes conclusiones a la cual somos llevados por la contemplación de las vicisitudes del mundo inanimado en relación a las del animado. Es claro

que si la acción de las causas inorgánicas *es uniforme como hemos supuesto*, ellas deben actuar muy irregularmente sobre el estado de los seres orgánicos... (Lyell, 1830: vol. II, cap. X, pág. 160).

Aunque no es común en Lyell la referencia al PUN como suposición, aquí lo hace de manera explícita, lo que permite sospechar que debió trabajar teniendo tal supuesto en mente. La siguiente es una de las expresiones más sugestivas del autor, en el sentido de que el conocimiento científico es conjetural:

Como los principios de la ciencia *siempre tendrán que permanecer indeterminados mientras no se consideren opiniones fijas*, procederemos a examinar otras objeciones las cuales han sido instadas contra la asunción de la uniformidad en el funcionamiento de la naturaleza (Lyell, 1830: vol. I, cap. IX, pág. 144).

De un lado, esta afirmación es compatible con la tesis de Popper de que es imposible alcanzar certidumbre en el conocimiento científico, es decir, que el conocimiento es conjetural. La diferencia es que Lyell habla en términos fundacionalistas cuando se refiere a principios científicos como opiniones fijas, mientras que Popper es antifundacionalista. De otro lado, en la segunda parte de la cita se observa de nuevo que Lyell asumía la uniformidad como supuesto metodológico. También, por contexto, se puede concluir que Lyell presupone la uniformidad de la naturaleza cuando escribe que: “Al final el filósofo se convence de la invariable uniformidad de las causas secundarias y guiado por su fe en este principio determina la probabilidad de anteriores hechos...” (Lyell, 1830: vol. I, cap. V, pág. 76). Y cuando expresa:

Nuestra estimación del valor de toda evidencia geológica y el interés derivado de la investigación de la historia de la tierra depende totalmente *del grado de confianza* que sentimos con respecto a la permanencia de las leyes de la naturaleza (Lyell, 1830: vol. I, cap. IX, pág. 165).

Las palabras “fe” y “confianza” se refieren a lo mismo. Lyell asume implícitamente la uniformidad de la naturaleza como un supuesto y no como un hecho en el mundo y con ello parece reflejar una actitud según la cual la fe en una buena conjetura permite al científico extraer mejores conclusiones.

Lo mostrado permite concluir que Hutton y Lyell no fueron estrictamente inductivistas, ellos recurrieron continuamente a la conjetura, la cual en muchos casos la con-

frontaron con los hechos, en una actitud claramente deductivista.

6. Sentidos de aplicación del PUN en Hutton y Lyell

Otro problema atribuido a los autores en estudio, es la variedad de sentidos de uniformidad dados al PUN, lo cual contribuyó en la confusión y aparición de interpretaciones contradictorias.

Hutton (1785: 6) se refiere explícitamente a la uniformidad en las operaciones cuando expresa: “Por tanto, partiendo de la suposición de que las operaciones de la naturaleza son estables y permanentes (...)” Al responder la pregunta de si las fuerzas de renovación son accidentales o connaturales al globo, **Hutton (1785: 38)** afirma: “(...) estas operaciones del globo permanecen en el presente con actividad constante, o en la plenitud de su poder”. A partir de este texto podemos colegir que para Hutton todas las operaciones o procesos son constantes en la naturaleza.

Por otra parte, no hay ninguna mención directa a la uniformidad de las leyes naturales en Hutton. Cuando se refiere a las operaciones de consolidación de los estratos hace una alusión clara a éstas:

(...) habría cierta uniformidad observable en los efectos, y habría leyes generales por las cuales estas operaciones deben haber sido conducidas (**Hutton, 1785: 11**).

Lo expresado aquí, más lo que dice al final de la segunda cita del numeral 4.1, sugieren a modo de prueba que para Hutton es obvia la existencia de las leyes naturales, por lo que no la menciona directamente. De estos hechos y del tratamiento que le da a la idea de ley en su obra, se puede concluir que él asume la uniformidad de las leyes. En este mismo orden de ideas, cuando comenta acerca de los rasgos y procesos de la superficie terrestre, se refiere a la uniformidad de causas: “Todos estos son los efectos de causas uniformes” (**Hutton, 1785: 46**). Y en la anterior cita se había referido a efectos uniformes que estarían por decirlo así bajo la tutela de leyes generales; y como Hutton supone que los efectos son a las causas y viceversa (ver también la parte inicial de la segunda cita del numeral 4.1), entonces naturalmente para él las causas estarían bajo la tutela de las leyes.

Cuando dice que “(...) no hay alteración con respecto a la naturaleza de las operaciones del globo. El sistema es siempre el mismo. Sólo se prolonga el espacio indefinido de tiempo en su existencia” (**Hutton 1785: 55 y 56**), sugie-

re la uniformidad de estado. Lleva así la uniformidad a una expresión extrema, “la del no cambio en el sistema terrestre”³, lo cual implica que es cerrado y por tanto la emergencia de nuevos hechos o fenómenos no es posible; algo que va de la mano con la suposición de que éste es perfecto. Esto plantea la negación de una evolución abierta, como se entiende sucede en el universo. Por otro lado, y según esta idea, al comparar diacrónicamente los fenómenos, éstos serían muy similares aún en momentos bien apartados en el tiempo, lo que impediría diferenciarlos históricamente. Creo que éste es el mayor desacuerdo de la teoría de Hutton, si se entiende que hoy para la ciencia lo único permanente en el universo es el cambio. De otro lado, al considerar que la destrucción de un continente y la formación de otro son fenómenos progresivos, Hutton insinúa la uniformidad de progresión, la cual se refiere a que el cambio se da a un ritmo lento y constante.

En resumen, Hutton aplica la uniformidad de operaciones o procesos, de leyes naturales, de progresión constante (ritmo) y la uniformidad de estado para el sistema terrestre. Es importante aclarar que el autor al aplicar el principio de uniformidad de la naturaleza al entendimiento de los fenómenos geológicos (hoy uniformismo) tuvo una indudable intención metodológica, pero en esto incurrió en afirmaciones sustantivas acerca del mundo y en algunos casos terminó dando a su método (si bien de manera indirecta) el carácter de teoría científica.

Lyell al igual que Hutton, aplica la uniformidad desde múltiples sentidos. En algunas de sus ideas afirma de manera muy explícita la uniformidad de las leyes naturales, a veces por él denominada *uniformidad de causas secundarias*. Hace referencia tácita a la uniformidad de las leyes, el orden de los eventos y las causas generales, de tal modo que las dos últimas categorías están claramente regidas en el discurso por un orden jerárquico que sugiere su dependencia de la uniformidad de las leyes. En otras palabras, tal como está planteado el asunto, Lyell piensa que de esas tres uniformidades sólo es importante la de leyes, ya que las otras parecen un recurso retórico para sustentarla (Lyell, 1830: vol. I, cap. V, pág. 75).

Otro aspecto de uniformidad que se puede identificar en Lyell es el del orden de la naturaleza. Cuando se refiere a los huttonianos, muestra dos ejemplos al respecto (Lyell, 1830: vol. I, cap. V, pág. 86). En el primero afirma:

Si ellos se esforzaron explicando el origen de ciertas rocas ígneas, o explicando las fuerzas que elevaron colinas o excavaron valles, o las causas que llevaron a la extinción de ciertas razas de animales, fue porque ellos primero presupusieron un original y similar orden de la naturaleza.

Sobre la base de los procesos enumerados en la primera parte de la cita, la última frase debe interpretarse en el sentido de que la naturaleza es uniforme en el orden de sus procesos.

En el segundo ejemplo expresa que en ausencia de confirmación empírica, los huttonianos tenderían a formular conjeturas (en el sentido de especulación), a menos que se pudiera asumir “la constancia invariable en el orden de la naturaleza”. Nuevamente, con base en el anterior análisis es posible concluir que Lyell se refiere a la uniformidad en el orden de los procesos de la naturaleza. Estas lecturas, se pueden interpretar en el sentido de que en la naturaleza los procesos o eventos responden siempre a la misma dinámica y en el sentido de que el estado o apariencia de la naturaleza es fundamentalmente estable. Es decir, el orden de procesos, en el sentido de tipos de procesos, al ser siempre el mismo mantiene una condición general dinámica de cambio cíclico, sin que necesariamente se presente un vector de progreso. Como dice Gould (1992: 142): “es un cambio continuo pero no lleva a ninguna parte.” Lyell expone esta idea en forma extrema cuando dice:

Entonces podría volver aquel género de animales cuya memoria se preserva en las viejas rocas de nuestros continentes. Podría reaparecer en los bosques el terrible iguanodonte y en los mares el ictiosaurio, y los pterodáctilos volverían a revolotear umbrías arboledas de grandes helechos (Lyell, 1830: vol. I, cap. VIII, pág. 123).

Otro aspecto de uniformidad que se encuentra en los “*Principios de Geología*” es el referente a las tasas de cambio o uniformidad del ritmo:

No estamos tratando de defender la doctrina de las catástrofes generales, recurrentes a ciertos intervalos, si los mismos considerables periodos de igual duración pudieran ser tomados en nuestra consideración y comparados unos con otros, no dudamos que la tasa

3 Esto es evidente respecto a los animales. En la página 48 de la “Teoría de la Tierra” Hutton expresa claramente que las diferentes especies animales se han mantenido en indefinida sucesión de edades, negando con ésto la evolución de las especies o la realización de un cambio unidireccional en los sistemas vivos y por tanto en el sistema terrestre.

de cambio en el mundo viviente e inorgánico sería casi uniforme... (Lyell, 1830: vol. II, cap. X, pág. 161).

Pero no es sólo que el cambio se dé a tasas uniformes, sino que éstas sean muy bajas: la velocidad de acción de los procesos es lenta. Lyell lo expone en varias partes de su obra. Así lo afirma en la continuación del texto anterior:

(...) Pero si consideramos cada una de las causas separadamente, las que sabemos que en el presente son las más significativas remodelando el aspecto de la superficie terrestre, encontraríamos que debemos esperar que cada una esté en acción por miles de años sin producir alteraciones significativas sobre la superficie habitable, para luego dar surgimiento durante un breve período a cambios importantes (Lyell, 1830: vol. II, cap. X, pág. 161).

Según Lyell, aunque se den catástrofes los ritmos no se aceleran, pues la acción de éstas sería equivalente al de las causas corrientes, suponiendo que éstas por miles de años no actuaran y de repente lo hicieran originando cambios notables en corto tiempo sobre la tierra. En conclusión, el ritmo de cambio es uniforme y normalmente lento. Suceden catástrofes, pero sus efectos son locales espacialmente y temporalmente se mitigarían por sus largos tiempos de recurrencia, dando un efecto final de uniformidad para el planeta. De los anteriores textos se infiere que Lyell aplica la uniformidad en los sentidos de leyes naturales, de procesos, de estado y de ritmo o tasas de cambio.

Para recapitular, Hutton y Lyell usaron el término de *uniformidad* de cuatro maneras básicas:⁴

1. Uniformidad de Leyes: Las leyes son invariantes en el espacio y el tiempo.
2. Uniformidad de operaciones o procesos: Los procesos del pasado geológico son los mismos que actúan hoy, por tanto no se tiene que recurrir para su explicación a causas desconocidas o extinguidas.
3. Uniformidad de estado: La tierra a pesar del cambio permanece siempre esencialmente igual. No hay ningún aspecto de su dinámica que manifieste algún vector de progreso unidireccional e inevitable.

4. Uniformidad de los ritmos de cambio: El cambio por la acción de los procesos de la dinámica terrestre siempre es gradual, lento y permanente.

6.1. Discusión

Gould (1992: 139 y 140) analiza las implicaciones epistemológicas de estas versiones de uniformidad desde los planteamientos de Lyell. Sostiene que la uniformidad de leyes y de procesos naturales “son juicios metodológicos, no afirmaciones sobre la naturaleza de la tierra”; luego agrega que tales juicios “son versiones geológicas de sendos principios fundamentales – inducción y simplicidad – reconocidos por todos los científicos, tanto hoy como en tiempos de Lyell”.⁵ En cuanto a las uniformidades de estado y de ritmo de cambio, afirma que “pertenecen a un estado radicalmente diferente, son teorías sobre la naturaleza de la tierra, propuestas que en el terreno empírico pueden ser juzgadas como verdaderas o falsas” (páginas 140), y argumenta que estos significados de uniformidad no pueden constituir teorías científicas ciertas, pues los hechos constantemente las contradicen.

Se viable pensar que Gould tiene la razón al considerar las uniformidades de estado y de ritmo como teorías sobre la naturaleza de la tierra y no como juicios metodológicos. Sobre los dos primeros significados de uniformidad, sin embargo considero que sus ideas son discutibles. Primero, aquello de que se trata de “juicios metodológicos” sólo se cumple para la uniformidad de leyes, y eso dentro de un marco no inductivista. En cuanto a la uniformidad de procesos, Gould la reduce, inspirado en los argumentos de Goodman, al principio de simplicidad. Pero si esta reducción es correcta, desde el punto de vista de Goodman también sería necesario reducir la uniformidad de leyes al principio de simplicidad, ya que Goodman toma el problema de la uniformidad en general y lo reduce totalmente a la simplicidad. Entonces, no es entendible que Gould aplique los criterios de Goodman de manera selectiva y parcial. Ya se discutió que el principio de uniformidad no es reducible al de simplicidad, por que estos principios son esencialmente de niveles epistemológicos diferentes.

Además, resulta contradictorio asumir la uniformidad de procesos como un juicio metodológico y no como una teoría sobre la tierra, pues al decir que las leyes son unifor-

4 Para evitar aumentar las denominaciones de estos diversos sentidos de uniformidad, aquí se acoge la nomenclatura de Rudwick (1972 en Gould, 1992).

5 Gould le atribuye a la uniformidad de leyes un carácter inductivo en la ciencia y sobre la uniformidad de procesos expresa que: “este principio recibe el confuso nombre de actualismo (...) es la noción en la que debemos apoyarnos para explicar el pasado a través de las causas que actualmente están operando. El filósofo Nelson Goodman (1967) reconoció que el actualismo no es más que una manera particular que tiene la geología para expresar una regla general del método científico, el llamado “principio de simplicidad”.

mes se habla de una característica de ellas y no de nada categórico sobre el mundo. En cambio si se dice lo mismo de los procesos geológicos, no se puede pasar por alto que éstos se refieren a regularidades del mundo, que en cualquier momento inician y en cualquier momento dejan de suceder. Esta hipótesis refuta la uniformidad de procesos como una teoría empírica, y la anula como juicio metodológico. Por ejemplo, decir que siempre ha llovido (un proceso que hoy nos parece regular) es comparable a decir que la apariencia de la tierra es siempre la misma o que los ritmos de cambio son siempre iguales. En todos estos casos estamos haciendo afirmaciones fácticas, que se pueden confrontar y por tanto corroborar o refutar en el terreno empírico.

En resumen, la propuesta de Gould mantiene la confusión que quería aclarar, pues según lo antes dicho, no resulta razonable decir que la uniformidad de leyes naturales es un presupuesto metodológico e inductivo, y es claramente insostenible afirmar que la uniformidad de procesos sea un presupuesto metodológico y equivalente al principio de simplicidad.

Es importante aclarar por qué la “uniformidad de procesos” ha tenido tanto éxito como recurso heurístico en el desarrollo de las ciencias geológicas. Al parecer el problema surge del hecho que describe **Hallam (1985)**, según el cual “la tierra ha sido un sistema físico que desde principios del Cambriano⁶ no ha mostrado cambios de direccionalidad importantes en los ritmos o en los tipos de procesos geológicos, o en la composición de la litosfera, hidrosfera y atmósfera” (**Hallam, 1985: 105**). Este hecho hace que la idea de la uniformidad de procesos se confirme en muchos casos y por tanto parezca cierta, lo cual a la vez hace que sea aceptada por la comunidad geológica. Pero a pesar de su utilidad práctica, el uso metodológico de esta supuesta uniformidad es problemático y genera más confusión respecto a la naturaleza epistemológica del uniformismo. La uniformidad de procesos, como se dijo, no es un enunciado metafísico sino empírico, así que su asunción puede implicar dificultades de consistencia lógica por un lado y, por el otro, un uso deflacionario de la noción de uniformidad. Ahora bien, desde el punto de vista científico se persiguen principios que estén libres de contradicciones lógicas y que se cumplan en todos los casos, con los cuales, en teoría, se puedan explicar los hechos de la dinámica terrestre. El postulado de la invariancia de las leyes satisface plenamente estas demandas.

7. Estatus epistemológico y definición del uniformismo

La ciencia empírica usa el PUN y su aplicación metodológica en la geología se denomina uniformismo. El uniformismo no representa epistemológicamente nada diferente al principio de uniformidad de la naturaleza. Por tanto definir el estatus epistemológico del PUN equivale a definir el del uniformismo. Según todo lo antes dicho, el uniformismo corresponde epistemológicamente a una conjetura metafísica *a priori* sobre el mundo, que desde el punto de vista metodológico se debe usar como un horizonte teórico límite, que el científico debe seguir en su búsqueda de leyes. El uniformismo no es un principio empírico e inductivo, ni una ley natural, ni una hipótesis o teoría científica, ni una tautología, ni un axioma; es sólo una conjetura metafísica *a priori*, que se puede usar metodológicamente como punto de partida para extraer explicaciones sobre la dinámica terrestre. Se le puede llamar principio, pero no en el sentido de fundamento de nuestras explicaciones de la realidad, como lo supone la lectura inductivista.

Respecto a la definición y denominaciones como “Uniformismo”, es importante aclarar que ni Hutton ni Lyell denominaron ni definieron de ninguna forma el uso metodológico del PUN en geología. Son comunes los nombres “actualismo y uniformismo”, que algunos usan como sinónimos, otros (**Gould, 1992**) asumen el “actualismo” equivalente a la uniformidad de procesos, entendida ésta “como una noción en la que debemos apoyarnos para explicar el pasado a través de las causas que actualmente están operando.” Dado que esta uniformidad es más una afirmación sustantiva que metodológica e implica un sentido de uniformidad diferente al de las leyes, se propone excluir el nombre de “actualismo”, para evitar la considerable confusión que genera.

Hay numerosas definiciones del uniformismo, la mayoría confusas, ambiguas y vagas, como sucede con el aforismo adoptado por Geikie en 1905 “el presente es la clave del pasado”. Como el uniformismo se refiere a la aplicación del PUN a la explicación de la dinámica terrestre y a éste Popper lo redujo al postulado de la invariancia de las leyes naturales, entonces su definición se puede plantear así:

La dinámica terrestre puede ser explicada a partir de suponer que las leyes físicas, químicas y biológicas son invariantes en el tiempo y el espacio.

6 Período geológico que se inició hace 570 millones de años y terminó hace 510 m.a.

Esta definición cumple plenamente las restricciones epistemológicas (que no sea inductivo ni empírico, ni una afirmación sustantiva sobre el mundo) que garantizan que el uniformismo sea una conjetura metafísica, la cual se puede usar metodológicamente para lograr explicaciones sobre la dinámica terrestre.

8. Conclusiones

El uniformismo históricamente se ha entendido como un enunciado inductivo y empírico, que incluye el postulado metafísico de la invariancia de las leyes naturales, y además una serie de afirmaciones teóricas acerca del mundo, como la uniformidad de procesos, estado y ritmo, las cuales fueron agregadas de manera confusa. Lo anterior dificulta entender su verdadera naturaleza epistemológica y su papel en el desarrollo de la geología. El hecho histórico de que el PUN se haya asumido como empírico e inductivo, no es suficiente para explicarlo satisfactoriamente, ni para justificarlo lógicamente y racionalmente. Por el contrario, en este trabajo se argumenta a favor de la tesis de que la mayoría de los problemas epistemológicos del PUN se deben precisamente a semejante visión. Una de las hipótesis fue que cualquier intento de caracterizar y analizar epistemológicamente el PUN desde la óptica inductivista está condenado al fracaso. Esta hipótesis se apoya en algunos aspectos de la teoría del conocimiento del filósofo K. R. Popper, para quien el PUN es una conjetura metafísica y *a priori*, o si se quiere, una idea reguladora que los científicos deben seguir en su búsqueda de leyes. Popper reduce tal conjetura al postulado de la invariancia de las leyes naturales. Desde este análisis, su función metodológica como hipótesis de trabajo, es totalmente viable, pues como conjetura metafísica lo que hasta hoy se ha entendido como PUN, no es una aserción dogmática sobre el mundo, sino una afirmación sobre una característica epistemológica de las leyes naturales, que permite hacer conjeturas sobre la realidad, las cuales pueden ser confrontadas con los hechos y ser aceptadas o rechazadas por ellos. Esto último, le devuelve al empirismo su papel en el desarrollo del conocimiento y a la vez le da a estas conjeturas credibilidad científica.

El PUN fue usado por Hutton y Lyell esencialmente como una conjetura aplicable metodológicamente para la interpretación de la dinámica terrestre, con la uniformidad de las leyes naturales como su principal referente. Ellos incurrieron en el uso de otros sentidos de uniformidad que corresponden más bien a afirmaciones categóricas o sustantivas sobre el mundo (como la uniformidad de procesos, estado y ritmo), lo cual históricamente ha originado mucha confusión sobre la naturaleza epistemológica del

uniformismo. El caso específico de la uniformidad de procesos es muy importante heurísticamente, pero no se debe tomar como un principio científico que se use metodológicamente para lograr explicaciones geológicas, pues ello implica una asunción deflacionaria de la noción de uniformidad.

Ni Hutton ni Lyell usaron algún término específico para denominar la aplicación del PUN a la explicación de la dinámica terrestre. Como ellos involucraron sentidos de uniformidad metodológicos y sustantivos a la vez, y también una visión inductiva del principio, los intentos de definir lo que se ha dado en llamar “uniformismo”, inspirados en su obra han sido infructuosos, pues constantemente se cae en definiciones contradictorias, vacías y ambiguas, lo cual no permite entender, entre otras cosas, exactamente qué es este principio y qué se puede lograr con él. Por el contrario, al considerar el PUN como una conjetura metafísica *a priori*, resulta fácilmente aceptable su reducción al postulado de la invariancia de las leyes, y sobre este postulado, se puede plantear una definición del uniformismo que supere las dificultades que se han mencionado varias veces. Recordemos la definición:

La dinámica terrestre puede ser explicada a partir de suponer que las leyes físicas, químicas y biológicas son invariables en el tiempo y el espacio.

Según esta definición, el uniformismo no es un principio inductivo empírico, ni una ley natural, ni una hipótesis o teoría científica, ni una tautología o axioma, es sólo una conjetura metafísica *a priori*, que se puede usar metodológicamente como hipótesis de trabajo para extraer explicaciones sobre la dinámica terrestre. Se le puede llamar principio, pero no en el sentido de fundamento o autoridad sobre el que se basan nuestras explicaciones de la realidad.

Desde una lectura inductiva el PUN incluye la creencia de que “el futuro será semejante al pasado”, criterio aplicado equivocadamente por los inductivistas a todos los hechos de la naturaleza. Según Popper “el futuro será en parte semejante al pasado y en parte en modo alguno semejante al pasado”. Este punto de vista y el hecho de que el PUN se haya reemplazado por el postulado de la invariancia de las leyes naturales, permite afirmar que el famoso aforismo de A. Geikie “el presente es la clave del pasado”, no es cierto, por tanto se debe concluir más bien que: “el presente no siempre es la clave del pasado.” Por lo anterior resulta contradictorio usarlo como un postulado metodológico para inferir explicaciones de la dinámica terrestre.

Agradecimientos

Al Dr. Armando Espinosa Baquero. Al Dr. Carlos Emilio García Duque. Al Dr. Rafael Macía Mejía. A Luisa F. García Londoño. A todos ellos mis agradecimientos por sus sugerencias y apoyo en la publicación de este artículo.

Bibliografía

- Estany, A.** (1993). Introducción a la Filosofía de la Ciencia. Primera edición. Barcelona: Crítica.
- Goodman, N.** (1967). Uniformity and Simplicity. Uniformity and Simplicity: A Symposium on the Principle of the Uniformity of Nature. New York: Special paper of The Geological Society of America, **89**: 93-99.
- Gould, S. J.** (1992). La Flecha del Tiempo. Mitos y Metáforas en el Descubrimiento del Tiempo Geológico. Primera edición. Madrid: Alianza Editorial S.A.
- Hallam, A.** (1985). Grandes Controversias Geológicas. Primera Edición. Barcelona: Editorial Labor S.A.
- Holmes, A. & Holmes, D.** (1980). Geología Física. Tercera Edición. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Hubbert, M.** (1967). Critique of the Principle of Uniformity. Uniformity and Simplicity: A Symposium on the Principle of the Uniformity of Nature. New York: Special paper of The Geological Society of America, **89**: 3-33. (Cito según mi propia traducción).
- Hutton, J.** (1785). Theory of the Earth; or an Investigation of the Laws Observables in the composition, dissolution and restoration of Land upon the Globe. (Cito según mi propia traducción). www.mala.bc.ca/~johnstoi/essays/Hutton.htm.
- Lyell, C.** (1830). Principles of Geology. Being an attempt to explain the former Changes of the Earth's Surface. Primera Edición. London: John Murray. (Cito según mi propia traducción).
- Martínez, J.** (1980). Ciencia y Dogmatismo: El Problema de la Objetividad en Karl Popper. Primera edición. Madrid: Ediciones Cátedra S. A.
- Miller, D.** (1995). Popper: Escritos Selectos. Primera edición en español. México: Fondo de Cultura Económica.
- Popper, K.** (1967). Conjeturas y Refutaciones. Primera edición. España: Ediciones Paidós.
- _____ (1992). Conocimiento Objetivo. Cuarta edición. Madrid: Editorial Tecnos.
- _____ (1994). Búsqueda sin Término. Tercera Edición. Madrid: Editorial Tecnos.
- _____ (1996). La Lógica de la Investigación Científica. Primera Reimpresión. México: Editorial Iberoamericana.
- Tarbuck, E. J. & Lutgens, F. K.** (1999). Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física. Sexta Edición. Traducción Ana María Rubio. España: Pearson Educación.
- Thornbury, W. D.** (1960). Principios de Geomorfología. Traducción de Juan C. Turner. Buenos Aires: Kapelusz S.A.

Recibido: noviembre 8 de 2007.

Aceptado para su publicación: diciembre 2 de 2009.

INFORME PRESENTADO POR EL ACADÉMICO DON JOSÉ A. LOZANO, SECRETARIO DE LA CORPORACIÓN, SOBRE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE EL AÑO ACADÉMICO 2008-2009

En este Informe solo se mencionarán de manera muy concisa algunas de las actividades desarrolladas por la Corporación, entre el 20 de agosto de 2008 y el 19 de agosto de 2009.

SESIONES

A. Junta Directiva

La Junta Directiva tomó las decisiones de su competencia, necesarias para el funcionamiento de la Academia, en once reuniones ordinarias y una extraordinaria. A continuación se destacan algunas decisiones y actividades de la Junta.

Se firmó el convenio No. 436 del 2009, por \$328.539.048, con el Ministerio de Educación Nacional, para el cumplimiento de sus funciones como cuerpo consultivo del Gobierno Nacional.

Se firmó un tercer contrato con la Academia de Ciencias para el Mundo en Desarrollo (TWAS) para administrar los fondos del programa de educación de la Red Interamericana de Academias de Ciencias –IANAS, en el 2009, por la suma de USD\$25,000 dólares. Contract No. IAP/3240205961/09/017- IANAS - ScEd.

Se expidió la Resolución No. 1 de 2008, para apoyar la realización y administración de los fondos del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica.

El IAP envió un comunicado sobre la Acidificación del Océano. La Junta avaló este comunicado en nombre de la Academia.

Maloka informó a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, que fue aceptada como “miembro formador” de esa corporación.

El 3 de julio, en las instalaciones de la Academia, se llevó a cabo un almuerzo de trabajo de la Junta Directiva con Don Francisco Miranda, Director de COLCIENCIAS, con el fin de lograr una mayor cooperación entre las dos entidades. Se trataron varios temas, entre otros:

- A. Nexos entre la Academia y los Centros Regionales de C,T&I de COLCIENCIAS.
- B. Enseñanza de las Ciencias basada en Indagación ECBI. Programa Ondas – La Ciencia en tu escuela AMC – Pequeños Científicos – ECBI en las Américas.
- C. Eventos científicos organizados por la Academia,
- D. Con referencia a la ley de ciencia tecnología e innovación (ley 1286/09). COLCIENCIAS espera colaboración en la reglamentación de la Ley.

Don Francisco Miranda expresó que está convencido que el país necesita una entidad como la Academia que, de una manera independiente y con la autoridad que otorgan el conocimiento y el respeto alcanzado, opine sobre temas de interés nacional. Debemos trabajar para que la Academia logre el reconocimiento y respeto general de la ciudadanía.

Doña Eloisa Bernal presentó renuncia al cargo de auxiliar de Biblioteca, a partir del 7 de abril de 2009. Doña Bibiana Dimaté la reemplazó en Biblioteca y se contrató a Doña Adriana Mosquera Walteros para el cargo que ocupaba Doña Bibiana.

Se contrató a Doña Carol Patricia Casas, para poner en formato Scielo seis números de la Revista de la Academia.

Se adquirió el Programa Helisa GW, Versión 2, módulo administrativo, bajo Windows y un nuevo equipo de cómputo para instalar esta nueva versión. Se adquirió un disco duro externo para hacer back up y se actualizaron los programas y las licencias necesarias para los equipos de la Academia.

B. Reuniones Ordinarias

Se celebraron siete reuniones ordinarias en el año académico. En estas reuniones, celebradas los terceros miércoles de cada mes, se dictaron las siguientes conferencias:

- Septiembre 17: Don **Rubén Ardila**: Ciencia y Pseudociencia ¿Por que ha sido tan difícil la consolidación de una ciencia del comportamiento?
- Octubre 15: Don **José A. Lozano**: “El programa de Educación en Ciencias de la Red Interamericana de Academias de Ciencias – IANAS”.
- Febrero 18: Don **Santiago Díaz Piedrahita**: “Un desconocido de la Química Colombiana”.
- Marzo 18: Don **Bernardo Gómez Moreno**: “La búsqueda de partículas supersimétricas con el nuevo acelerador LHC del Laboratorio CERN”.
- Abril 15: Don **Michel Hermelin**: “Geómetro: intento de divulgación científica en Medellín”.
- Mayo 20: Doña **Elizabeth Castañeda**, titulada: El brote de criptococosis en la isla de Vancouver en Canadá: ¿conocemos su origen?.
- Junio 17: Doña **Margarita Perea**: “Importancia de la Biotecnología en el mejoramiento de frutales”.

C. Sesiones solemnes

Durante la sesión Solemne Estatutaria del 21 de agosto de 2008, el Académico Don Armando Espinosa Baquero, presentó el estudio de fondo titulado: “La amenaza sísmica de Bogotá”. El “Premio a la Obra Integral de un Científico”, fue otorgado a Don Santiago Díaz Piedrahita y a Don Jaime Lesmes Camacho.

El “Premio Academia de Ciencias para el mundo en desarrollo TWAS, para científicos jóvenes colombianos”, en el campo de la matemática, fue otorgado a Don Elder Jesús Villamizar Roa, profesor de la Universidad Industrial de Santander.

En esta ceremonia fueron exaltadas a la categoría de miembro honorario Doña Alicia Dussán de Reichel y Doña María Teresa Murillo.

Noviembre 18: Se realizó un acto académico con motivo de los 75 años de la promulgación de la Ley 34 de 1933 que le dio carácter oficial a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y la declaró órgano consultivo del Gobierno Nacional, en lo relativo al fomento y estudio de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Don José Luis Villaveces Cardoso, dictó la conferencia de fondo: “Un país despierta a la ciencia.”.

En sesiones solemnes se posesionaron dos miembros correspondientes, quienes presentaron los trabajos científicos exigidos por los estatutos:

- Octubre 29: Doña Helena Groot, “La genética: Una herramienta para el estudio de poblaciones humanas”.
- Abril 29: Don Carlos Alberto Vargas Jiménez, “Nuevos aportes a la estimación del potencial de hidrocarburos en Colombia”.

D. Sesiones especiales

La Academia se integró a la conmemoración del Bicentenario de la muerte de Don José Celestino Mutis, con conferencias programadas los miércoles entre el 27 de agosto y el 8 de octubre. El programa del ciclo de conferencias sobre la vida, obra y entorno histórico de Don José Celestino Mutis fue el siguiente:

- Agosto 27: “Los colaboradores de Mutis”. Don Santiago Díaz Piedrahita, Presidente Academia Colombiana de Historia.
- Septiembre 3: “La astronomía y José Celestino Mutis”. Don Jorge Arias de Greiff, Académico Honorario ACCEFYN.
- Septiembre 10: “Las Ciencias Naturales en España en la época de Mutis”. Don Francisco García Novo, Miembro de la Real

Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España.

Septiembre 24: “La Flora de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada”. Don José Luis Fernández Alonso, ACCEFYN – Universidad Nacional de Colombia.

Octubre 1: “La medicina y Mutis”, Don Zoilo Cuellar. Presidente Academia Colombiana de Medicina.

Octubre 8: “Mutis, lector de Wolff, Descartes y Newton” Don Luis Carlos Arboleda. ACCEFYN – Profesor Doctorado Interinstitucional en Educación.

Se destaca la participación de un miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España, Don Francisco García Novo, botánico y ecólogo de reconocida fama internacional.

La Academia fue la anfitriona de la reunión mensual del Colegio Máximo en el mes de septiembre. La conferencia central titulada: “Perspectivas de la Agroindustria de aceites esenciales en Colombia” estuvo a cargo de Doña Elena Stashenko.

Dentro del ciclo de conferencias “Encuentro con la ciencia”, programadas conjuntamente con la ACAC, se dictaron las siguientes charlas:

- Myriam Sánchez de Gómez “Significado biológico del eje hormona de crecimiento (GH) factor de crecimiento similar a la insulina (IGF)”.
- Doña Marcela Camacho “Macrófagos: Tráfico vesicular”.

El 27 de Marzo se realizó una sesión extraordinaria para elegir los cinco miembros de número que ocuparán las sillas disponibles:

La silla 6 ocupada anteriormente por Víctor E. Caro y Jorge Arias de Greiff.

La Silla 7 ocupada anteriormente por Luis Cuervo Márquez, Daniel Mesa Bernal y Jesús Antonio Eslava Ramírez.

La Silla 15 ocupada anteriormente por Enrique Pérez Arbeláez, Gerardo Reichel Dolmatoff y Alicia Dussan de Reichel.

La Silla 20 ocupada anteriormente por Ernesto Osorno Mesa y Luis Enrique Gaviria Salazar.

La Silla 28 ocupada anteriormente por Manuel José Casas Manrique y María Teresa Murillo Pulido.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la votación fueron escogidos como candidatos a miembro de número de la Academia los siguientes académicos:

- Luis Alejandro Barrera Avellaneda
Ocupará la silla No. 28
- Carmenza Duque Beltrán
Ocupará la silla No. 15
- Armando Espinosa Baquero
Ocupará la silla No. 6
- Felipe Guhl Nannetti
Ocupará la silla No. 20
- Germán Póveda Jaramillo
Ocupará la silla No. 7

Se conformó un Comité de Académicos interesados en la revisión de los Estatutos de la Academia, coordinado por el presidente, Don Jaime Rodríguez Lara. Este comité se reunió en cuatro oportunidades y se convocó al pleno para el 12 de Agosto a una reunión especial para discutir las reformas propuestas por el Comité.

FALLECIMIENTOS

La Academia lamenta el fallecimiento del académico de número Don Jesús Eslava (Diciembre 26 de 2008).

Capítulos

Con el fin de lograr un cubrimiento nacional la Academia ha venido creando capítulos regionales así:

Capítulo de la Región Caribe creado el 23 de noviembre del 2000, Capítulo Sudoccidental creado el 2 de abril de 2003 y el Capítulo de Antioquia creado el 13 de noviembre de 2003.

El capítulo de la Región Caribe tiene miembros en Santa Marta, Cartagena y Barranquilla

El capítulo Sudoccidental, con miembros en Cali y en el eje cafetero.

El capítulo de Antioquia, ha logrado consolidarse con la coordinación de Doña Ángela Restrepo y la secretaría de Don Michel Hermelín.

A continuación se adjunta un resumen de las actividades desarrolladas por el Capítulo, elaborado por Don Michel Hermelín.

1. Participación en varias organizaciones regionales

• Expedición Antioquia

Se envió una comunicación en el sentido de que los miembros del Capítulo seguirán colaborando en forma individual.

• PLANEA

Se reunirá más información acerca de esa entidad, dependiente de la Dirección Departamental de Planeación, antes de discutir formalmente una posible participación como capítulo.

2. Candidatos a miembros correspondientes

Es importante robustecer el Capítulo de Antioquia con nuevos miembros correspondientes. M. Hermelin insiste en que todos los miembros deben seleccionar, en las diferentes áreas de sus universidades, posibles candidatos; los asistentes estuvieron de acuerdo en que debe dársele fuerza al capítulo y buscar que para inicios del próximo año se tengan por lo menos unos 10 candidatos. El Capítulo decide recomendar la candidatura de Fanor Mondragón.

3. Ley de Ciencia y Tecnología

El Capítulo decide enviar un mensaje expresando que la considera un avance en el mejoramiento de la situación de la actividad científica en Colombia.

4. Conferencia anual

Para conmemorar el quinto aniversario del Capítulo de Antioquia de la Academia fue invitada la Dra. Elena Stashenko de la Universidad Industrial de Santander, ella dictó la Conferencia: "Química de la fragancia del Laboratorio al campo". Posteriormente se ofreció una comida.

5. Parque Explora

C. Escobar director de Explora, comentó su complacencia por la oferta de colaboración hecha a nombre del Capítulo. Manifiesta el interés que tiene de que el Capítulo de Antioquia participe como jurado en Expotecnología que se realizará de Octubre 19 al 25 (2009). Al respecto P. Abad se encargó de enviar a todos los miembros del capítulo datos concretos para poder definir el compromiso.

Ciclo de conferencias. Los asistentes estuvieron de acuerdo en que los temas de conferencias propuestas a

Explora que habían sometido anteriormente siguen vigentes; además se insiste en que el programa propuesto a Explora sea ofrecido a maestros, estudiantes universitarios y exploradores (estudiantes que son empleados por Explora como monitores). El programa de conferencias propuesto por Explora será debidamente analizado. Se le envió a Explora la lista de conferencias que ofrecen los académicos, con el fin de que el Capítulo tenga participación en las actividades del Parque Explora y se pueda elaborar un programa.

6. Miembros de número

Se postulan G. Roldan, L. F. Echeverri, Germán Poveda y L. F. García. Fue elegido Germán Poveda.

7. Visita del profesor F. García de la Universidad de Sevilla

Por lo improvisado del aviso, solamente la Dra. Ángela y el Dr. Hermelin pudieron atender, en nombre del Capítulo, al Académico Francisco García, quien demostró tener fuertes conocimientos en Geología y una amplia visión del mundo. F. García se comprometió en enviar datos sobre la Academia de Ciencias de Sevilla y su relación con la Academia Española, que hasta ahora no se han recibido.

8. Biblioteca virtual de Científicos de Antioquia

M. Hermelin retomó los contactos con Natalia Hoyos, nieta de Gerardo Botero, geólogo fallecido, quien por mutuo acuerdo entre el Capítulo de la Sociedad Colombiana de Geología y el Capítulo de Antioquia encabezaría la lista de los científicos antioqueños seleccionados. Se obtuvo el permiso de los herederos. Se firmó el Acuerdo Tripartita (Universidad Nacional, Universidad EAFIT y Academia) para la Biblioteca Virtual de Científicos Antioqueños, en el contexto de la Comisión de Publicaciones de la iniciativa "Antioquia 200 años" y se iniciaron los contactos necesarios con coautores y editores, así como el escaneo de la obra de Gerardo Botero.

9. Balance de actividades del quinquenio

Con relación al balance del primer quinquenio de actividades del Capítulo, M. Hermelin manifestó que los resultados son bastante exigüos. J. Cossio hizo claridad en que el XVI Congreso de Matemáticas del 2007 debía incluirse dentro de dichas actividades, pues su realización tuvo apoyo por parte de la Academia; además debe incluirse el Congreso Colombiano de Geología del 2005, que también contó con su respaldo. Además la Academia

apoyó al X Congreso Internacional de Paracoccidiodomicosis, celebración del centenario y el Simposio sobre Gestión del Riesgo en el Valle de Aburrá, conmemorativo de los 20 años del desastre de Villatina).

10. Carta de apoyo a la Academia H. Stashenko

Se envió una carta de apoyo aprobada por la mayoría de los miembros. Se convino en ratificar la solicitud a la Junta Directiva de la Academia en el sentido de que se manifieste al respecto, pues se trata de un asunto de gran importancia, y es apenas obvio que un académico reciba el respaldo de la institución en sus labores académicas de difusión y extensión.

11. Charlas ofrecidas por los académicos (Internas)

- Germán Poveda: Calentamiento climático: causas, efectos y retos para Colombia y el planeta.
- M. Hermelin: el Valle de Aburrá
- Pablo Patiño (Parque Explora): Feria Explora de Ciencia, Tecnología e innovación y XIV Cuidamundos, una nueva aventura.
- J. I. Martínez: "El fenómeno de El Niño en el pasado".

Para que las actividades del capítulo conserven una memoria, L. F. García sugirió hacer una base de datos con las conferencias anuales y las charlas que a nivel interno se dictan mensualmente.

12. Cuota

Para sufragar los diferentes gastos del capítulo los asistentes acordaron hacer un aporte de \$150 000 cada uno por el año 2009.

13. ACAC

Convención Científica Nacional 2010 y Reunión Explora. Germán Poveda preparó una propuesta al Capítulo en relación con la temática propuesta para la Convención Científica Nacional que se realizará en el 2010. La propuesta fue analizada por todos los académicos y enviada con carácter institucional (Capítulo de Antioquia) al Parque Explora, quien es la entidad en la que ACAC ha delegado toda la organización del evento.

14. Posición ante el cambio de estatutos de la Academia

El Capítulo acuerda plantear los siguientes cambios:

- ampliar en el número de integrantes a Académicos de Número (indefinido)
- cambiar de nombre a Academia Colombiana de Ciencias.
- la Academia debe estar representada en el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Consejo Nacional de Ciencias Básicas
- debe buscarse participación de la Academia en la reglamentación de Ley de Ciencia y Tecnología
- se debe mejorar el sistema de votación (electrónico)

15. Varios

15ª. El Doctor Gabriel Roldan presentó sus últimas producciones:

2º edición del libro Fundamentos de Limnología Neotropical y dos artículos publicados en la Revista de la Academia:

- Evaluación de La calidad del agua de las microcuencas de la Laucha, La Legia, La Rastrojera utilizando los macro invertebrados como bioindicadores, Municipio de Durania Departamento Norte de Santander Colombia. V. 32.
- Estudio de Emergencia de insectos acuáticos en la zona de bosque ripario, bosque plantado y pastos, Abejorral, Antioquia, Colombia V. 32, No 122.

16. Mina Cajamarca

Por solicitud del Dr. Gabriel Poveda, se le enviará carta a la Junta Directiva para que designe una comisión que haga claridad acerca del tipo de manejos ambientales que seguirá la compañía para la explotación.

PARTICIPACIÓN EN ACTIVIDADES NACIONALES E INTERNACIONALES

La Academia Colombiana de Ciencias continuó su afiliación y participación en el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU), el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP), la Red de Derechos Humanos de las Academias de Ciencias y Sociedades Científicas, la Fundación Internacional para la Ciencia (IFS), la Unión Internacional para la Investigación del Cuaternario (INQUA), la Unión Internacional de Historia y Filosofía de la Ciencia (IUHPS), el Consejo Internacional de Ciencia (ICS), el Panel Internacional de Academias de Ciencias

(IAP), la Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS) y ejerce la Vicepresidencia de la Comunidad Científica del Caribe (CCC) y mantiene estrechas relaciones con la Academia de Ciencias para el Mundo en Desarrollo (TWAS).

A nivel nacional es miembro del Colegio Máximo de Academias, de la Fundación Pro-Sierra Nevada de Santa Marta, miembro de la Junta Directiva de la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia, miembro formador de Maloka, miembro de la Junta Directiva de la Alianza Pequeños Científicos, es aliado estratégico del Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología (OcyT), miembro afiliado de la Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias (ACOFACIEN) y preside el Comité Directivo de la Red Colombiana de Formación Ambiental (RCFA).

La Academia participó a través de su Presidente, Don Jaime Rodríguez Lara, o sus delegados en numerosos eventos y reuniones, de carácter nacional e internacional, de los cuales se mencionan algunos:

El 25 de agosto, se reunieron el presidente y el secretario, con Doña Martha Giraldo, directora de la Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada – RENATA, que no ha logrado la aceptación y el desarrollo deseados. La Academia transmitió estas inquietudes a la Asamblea de ACOFACIEN que se reunió en Pamplona en el mes de septiembre.

Como miembro de la junta directiva de ACAC, participó en la asamblea general ordinaria de asociados, realizada en el auditorio “Benjamín Alvarado Biester” de Ingeominas, el 25 de marzo/2009.

Asistió con el secretario y otros académicos al Seminario sobre Ciencia Tecnología e Innovación, convocado por el MEN, COLCIENCIAS y Planeación Nacional.

Participó en el Panel Internacional: Prospectiva y Evaluación en Ciencia, Tecnología e Innovación, organizado por Colciencias.

Asistió al Ministerio de Educación Nacional, junto con el secretario y la tesorera, a la primera reunión del proyecto: Historia Hoy – Aprendiendo con el Bicentenario de la Independencia. También fueron invitados como cuerpos consultivos las Academias de Historia y de la Lengua.

Participó en la “XVII Convención Científica Nacional - Transferencia de Conocimiento y Tecnología 2008”, organizada por la ACAC en Neiva, Huila, el 23 y 24 de

septiembre. Participaron entidades como Colciencias, MEN la Alcaldía y la Gobernación del Huila.

Participó, entre el 29 de septiembre y el 3 de octubre, en el Cuarto Taller Latinoamericano de ECBI para profesores de Ciencias del nivel secundario, en la Paz, Bolivia. Desarrolló un taller sobre electricidad y magnetismo. En la Academia de Ciencias de Bolivia dictó una conferencia sobre las actividades que desarrolla nuestra Academia y mostró el video institucional

Asistió el 9 y 10 de octubre al Encuentro Colombo-Hispano en Armenia, se presentaron los proyectos de varias regiones, involucrando la Empresa-la Academia y el Estado. El académico Armando Espinosa presentó el proyecto “Enciclopedia de Desastres Naturales”, que desarrollan la Universidad del Quindío y la Academia a través del Doctor Espinosa.

Representó a la Academia en la “II Reunión de Ministros y Altas autoridades en Ciencia y Tecnología en el ámbito del CIDI (Consejo interamericano de desarrollo integral-OEA), que se realizó del 26-28 de Octubre 2008 en México DC. Participaron personalidades oficiales de 20 países Americanos: 58 personas de las cuales 8 ministros de C y T o de Consejos Nacionales de C y T; Observadores de OEA – UE – Organismo Regionales e Internacionales (ICSU, IANAS, BID, CEPAL, CYTEC, etc.). La Academia estuvo como invitada especial. Se eligió la mesa directiva.

Asistió, el 6 de noviembre, en el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, al lanzamiento del libro Las Ciencias Ambientales: una nueva área del conocimiento, editado por la Red Colombiana de Formación Ambiental.

Asistió, el 10 de febrero, a la promulgación de la Ley de Ciencia y Tecnología realizada en el Palacio de Nariño.

Asistió, el 7 de mayo, a la graduación en ECBI de 9 colegios en la Universidad de los Andes. Participaron Gas Natural y la Secretaría de Educación del Distrito.

Asistió con Don José A. Lozano, a una reunión con el presidente de ASOCARS, Dr. Ramón Leal. También asistieron el Director de Conservación Internacional, Francisco Arjona y el subdirector de Recursos Naturales de la CAR, Hebert Rivera. Están interesados en cooperar con la Academia y lograr reconocimiento científico para los trabajos que llevan cabo. Se tratará de implementar un programa de posgrado para docentes de secundaria, en la universidad del Quindío, con la cooperación de la CRQ y las Secretarías de Educación de Armenia y del Quindío,

con el respaldo de ASOCARS y ACCEFYN, siguiendo el esquema de formación investigativa - participativa.

Fue invitado, con Don José Lozano, por la Academia Mexicana de Ciencias, para participar en los talleres, los días 5, 6, y 7 de abril, con colegas de Panamá, República Dominicana, Guatemala y Perú. El objetivo de estos talleres es ayudar a los países que están iniciando el trabajo con maestros en programas ECBI e intercambiar experiencias entre programas ya establecidos. Don José A. Lozano hizo una presentación del Taller sobre zona costera del libro Cambio Global, publicado por la Academia y repartió 19 ejemplares de este libro.

Asistió, el 2 de junio, al Foro Internacional sobre Investigación, organizado por el Ministerio de Educación y el Departamento Administrativo Colciencias, Encuentro que pretende articular los diversos esfuerzos para fortalecer la Ciencia, la Tecnología y la Innovación en el País.

Participó del 15 al 18 de julio con Doña Inés Bernal y Don José A. Lozano en el Congreso Internacional de Educación en Ciencias, que se realizó en la ciudad de Cartagena. Cada uno dictó una conferencia.

Participó el 23 y 24 de julio, en la reunión de la Comunidad Científica del Caribe, realizada en Santo Domingo, República Dominicana, donde fue reelegido como Vicepresidente.

Recibió, entre otras:

La visita del agregado político de Brasil quien solicitó el voto de la Academia por Hernán Chaimovich para presidente de ICSU. La Academia lo respaldó.

El agregado cultural de la embajada de Rusia don M. Shumikhin en compañía del tercer secretario, don Yuri Milkin. Están interesados en incrementar las relaciones culturales y científicas con Colombia.

Representantes de la Organización para la Educación y Protección Ambiental (OPEPA). Proponen que la Academia entre al programa UNESCO – PHI – WET, que es un programa de agua y educación dirigido principalmente a la comunidad de educadores colombianos. Se quiere crear un comité nacional con varias instituciones para desarrollar este programa.

Dentro de sus actividades como Secretario de la Academia y punto focal del proyecto de Educación de IANAS, Don José A. Lozano participó entre el 18 y 24 de octubre en la reunión mundial del programa de educación en ciencias en Santiago de Chile y en el “Meeting of the Global

Activities Committee of the IAP Program on Science Education”. Se discutió el tema de la formación continua de los docentes y se revisaron algunas actividades futuras de carácter regional y global.

Del 11 al 13 de septiembre de 2008, Don José A. Lozano asistió en representación de la Academia y actuó como secretario de la XIII Asamblea de la Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias ACOFACIEN, en la ciudad de Pamplona.

El Director del Consejo Nacional de Ciencias Básicas, hizo la presentación del Plan Estratégico de Desarrollo “Colombia Construye y Siembra Futuro”, que tiene por objetivo crear las condiciones para que el conocimiento sea un instrumento de desarrollo. Se discutió como debe colaborar ACOFACIEN.

Paulo Orozco, Asesor del Director General del SENA presentó el nuevo modelo pedagógico que se desarrolla actualmente en los centros del SENA. Este modelo tiene como premisas la flexibilidad, la eficiencia y la productividad. El enfoque del aprendizaje se hace por el desarrollo de competencias y a través de la ejecución de proyectos. Los proyectos se refieren a temas del mundo real. Los instructores se convierten en promotores y guías en cambio de ser transmisores de conocimiento, el trabajo se desarrolla en equipo. Cada estudiante escoge su propia ruta de capacitación al escoger el porcentaje en el que contribuirán en su formación cinco grandes paquetes tecnológicos. Esta presentación generó un amplio debate.

También se discutió la relación Universidad- Empresa- Estado. En Antioquia ya existe la percepción de que hay que mantener las estrechas relaciones Empresa- Universidad – Estado. En Bogotá existe también un Comité de Ciencia y tecnología pero no ha dado los mismos resultados.

Se estudiará la posibilidad de seguir los pasos de TECNOVA en Medellín o desarrollar una estructura similar.

Don José A. Lozano como coordinador del Programa de Educación de IANAS, participó en el taller Latinoamericano sobre Alfabetización Científica”, donde presentó la conferencia: “Actividad del programa de educación de IANAS en el continente americano” y tuvo una corta intervención en la sesión inaugural. Se realizó del 10 al 12 de noviembre en la ciudad de Buenos Aires, Argentina.

Participó en el IV Seminario Nacional del Programa ABC en Sao Paulo Brasil, que se realizó entre el 26 de noviembre y 1 de diciembre. Aquí también presentó un

informe sobre el Programa de Educación de IANAS y participó en las discusiones de promoción de la integración del programa ABC de las diferentes ciudades de Brasil.

Participó en la reunión del IOC (International Oversight Committee) y del GAC (Global Activities Committee), realizado entre el 7 y el 11 de febrero en Ámsterdam, que revisó las actividades regionales del programa ECBI Global del IAP.

Representó a la Academia en la XIV Asamblea de la Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias ACOFACIEN, que se realizó en Riohacha, del 11 al 15 de marzo y actuó como secretario. Se constituyeron tres grupos y seis mesas de trabajo, que discutieron: a) Ley de Ciencia y Tecnología y Resolución 2769. b) Pregrado y doble titulación y c) Posgrados.

a) Se acordó que cada Facultad enviara sugerencias sobre la reglamentación de la ley 1286, a la Universidad El Bosque y a la Universidad de Antioquia. La Universidad Nacional, sede Medellín, quedó encargada de recibir la información para enviar a COLCIENCIAS sobre aspectos procedimentales de proyectos de investigación: problemas, costos, contrapartidas, overhead, gestores de proyectos, sistema Scienti, Cvlac, Gruplac.

La resolución 2769, se revisó artículo por artículo y se propusieron los cambios correspondientes, para enviar al MEN.

b) Se presentaron las actualizaciones de las estadísticas sobre Pregrado.

María Yolanda Aguirre, de la Universidad de Caldas, informó sobre el pregrado, hay datos que no tienen una explicación adecuada y es necesario aclarar y enfrentar problemas como el de la deserción y para esto es necesario completar la información. Se hizo una redefinición de variables para actualizar la encuesta.

Se recomendó socializar los parámetros que se consideran para la elaboración de los ECAES.

En lo referente a doble titulación, en la página web de ACOFACIEN, hay una declaración conjunta de ACOFACIEN-ASCOFADE.

c) Se presentaron las actualizaciones de las estadísticas sobre Posgrado. Luis Carlos Gutiérrez, de la Universidad del Atlántico presentó, el informe sobre el posgrado. No se sabe qué se investiga en los programas.

Álvaro García solicitó revisar, antes del 20 de mayo, la información y enviarla actualizada. Carlos Corredor

enfaticó que solo se tendrá información fidedigna si la suministran los decanos.

Participó en la VII reunión del Consejo Hemisférico (Reunión de Puntos focales) del Programa de Educación en Ciencias de IANAS, realizada en Washington entre el 4 y el 6 de mayo de 2009, en donde se presentó el Informe de las actividades desarrolladas en el 2008 y se aprobó la propuesta para el 2009 del proyecto ECBI-IANAS-IAP, coordinado por José A. Lozano.

También se presentó el informe de las actividades 2007-2010 del programa IANAS-FEMCIDI, coordinado por Jorge Allende, de Chile, que fue considerado como excelente por la OEA. Se aprobó presentar un nuevo proyecto a OEA-FEMCIDI (2010-2013) que coordinará Jorge Allende con la ayuda de un comité ejecutivo constituido por Diógenes Campos (Brasil), María del Carmen Samayoa (Guatemala) y José A. Lozano (Colombia). También se presentará un proyecto a la Kellogg Foundation, a través del NSRC.

La Academia designó a la profesora Ángela Patricia Guerra López para asistir al curso de Formación de Formadores, promovido por la Academia de Ciencias de Brasil, dentro del convenio IANAS-OEA, en Río de Janeiro entre el 22 y 30 de marzo/2009. Se recibió el material del tema Diagnóstico Ambiental. Este material permitirá reproducir el mismo taller ó talleres similares, en nuestro País.

En julio 26_28 se llevó a cabo una reunión en Guatemala convocada por IANAS y la Academia de Guatemala: "Science Funding Landscape in Central and South Americas & the Caribbean Region". Esta reunión convocó a las Academias, las universidades oficiales, los consejos de ciencia y jóvenes científicos de 18 países. La Academia sirvió de intermediaria en la participación del grupo Colombiano.

Don Moisés Wasserman, como miembro del "Committee on Freedom and Responsibility - CFR", participó en la 29th Asamblea General de ICSU que se celebró en Maputo, Mozambique realizada del 21 al 24 de octubre de 2008 en la cual se eligió junta directiva de ICSU. Don Moisés Wasserman fue reelegido como miembro del CFR.

También como delegado de la Academia participó, del 21 al 23 de mayo, en la reunión del International Human Rights Network of Academies and Scholarly Societies, realizada en Rabat, Marruecos, en donde propuso a Colombia como sede de la próxima reunión, como una de las actividades de celebración del bicentenario.

Don Gonzalo Andrade viajó a la ciudad de Cusco, Perú, entre el 1 y 6 de septiembre de 2008, con el fin de

asistir al “workshop del proyecto de Diversidad de las Mariposas Andinas Tropicales”, organizado en dos partes: una “Tropical Andean Butterfly Diversity Project (TABDP)” y otra “International Conference on Andean Butterflies”, durante esta reunión presentó dos trabajos sobre mariposas de Colombia.

Doña Inés Bernal continúa participando, en representación de la Academia, en las reuniones del Comité de Evaluación de la “Oferta Bibliográfica de FUNDALECTURA”.

Don Julio Carrizosa como investigador principal, miembro de la Academia y asesor de la UDCA, coordinará el Proyecto sobre el corredor ecológico del borde norte de Bogotá, aprobado por la CAR, y que se presentó a COLCIENCIAS con la participación de la UDCA y la Academia. Se han efectuado reuniones en la UDCA, en la Academia y en la casa del Dr. Thomas van der Hammen, con los profesores que van a participar en el proyecto.

Don Felipe Guhl presentó, el 19 de febrero, en la Academia Nacional de Medicina, una charla sobre “Darwin en Suramérica” en honor del bicentenario del nacimiento de este ilustre científico.

Doña Ángela Camacho asistió, en nombre de la Academia, al Simposio Regional “Mujeres para la Ciencia” organizado por IANAS, en la Ciudad de México, los días 20 y 21 de abril de 2009. La Academia Mexicana de Ciencias fue la institución anfitriona. El simposio reunió a 31 participantes de 16 países de América del Norte, Centroamérica, América del Sur y la región del Caribe. Se revisaron las actividades previas y se propusieron algunas actividades para el futuro.

La Academia postuló al académico Don Humberto Rodríguez para integrar la Comisión Científica que participó en la planificación detallada del taller para tratar el informe del IAC sobre energía, *Lighting the Way* (Iluminando el camino), en el contexto de las Américas, a fines de 2008.

Don Gabriel Roldán, punto focal de Colombia en el programa de agua de IANAS, participó como conferencista invitado con la ponencia “Macroinvertebrates as Bioindicators of Water Quality”, en el curso internacional para líderes de programas de uso y manejo de agua en todos los países latinoamericanos “Integrated Water Resources Management”, que se celebró del 4 al 9 agosto de 2008, en Sao Carlos, Brasil. Por Colombia también asistió la Ingeniera Claudia Campuzano. Está colaborando en la creación del Instituto para la investigación del agua en Antioquia con el patrocinio de PLANEA.

También participó, como conferencista en el Curso Internacional “Gestión Integral de los Recursos Hídricos de las Américas”, realizado en Managua, Nicaragua entre el 2 y 3 de junio, organizado por IANAS y varias entidades de Nicaragua.

Don Germán Poveda representa a la Academia en el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP), como coordinador del capítulo colombiano. En tal carácter participó en numerosas reuniones de las cuales se mencionan las siguientes:

Reunión del Consejo Asesor del Proyecto Piloto Nacional de Adaptación al Cambio Climático, INAP. El objetivo del INAP es apoyar la definición e implementación de medidas piloto de adaptación específicas y opciones de política para prevenir anticipadamente los impactos del cambio climático, en ecosistemas de alta montaña, áreas insulares del Caribe colombiano y salud humana (dengue y malaria). Bogotá, Julio 30 de 2009.

Taller científico Costos y Beneficios de la Adaptación al Cambio Ambiental Global en Colombia”, convocado por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) e IDEAM, Bogotá, 20 de mayo de 2009.

Taller Nacional para la Construcción de la “Estrategia Andina para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos”, Organizado por la Secretaría General de la Comunidad Andina, Bogotá, 12 de mayo de 2009.

Workshop Valuing Rainforests as Global Eco-Utilities, Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Sao Jose dos Campos, Brasil, April 23-24, 2009.

Don German Poveda y su grupo de investigación presentaron varias ponencias en congresos científicos:

Poveda, G., Evidencia de los impactos del cambio climático y la deforestación sobre los recursos hídricos y la malaria en Colombia. V Versión del Mes de la Investigación, Universidad Nacional de Colombia, Sede Amazonia, Leticia, mayo 14 de 2009.

Poveda, G., Calentamiento climático global: Causas, efectos y retos para Colombia y el mundo, I Encuentro Internacional Cambio Climático Carbono Neutral, Universidad del Rosario, Bogotá, Bogotá, abril 21, 22 y 23 de 2009.

Poveda, G., Evidences of climate and environmental change on water resources and malaria in Colombia, Conferencia científica internacional “Climate Change: Glo-

bal Risks, Challenges & Decisions”, Copenhagen, Dinamarca, 10 al 12 de marzo de 2009.

Poveda, G., La hidroclimatología de Colombia en distintas escalas espacio-temporales, Conferencia en el Centro de Pronóstico Climático (CPTEC), Cachoeira Paulista, Brasil, 26 de Noviembre de 2008.

Poveda, G., R. Galárraga-Sánchez, C. Llerena, E. Palenque, L. Bravo, S. Bennet, P. Bunyard, J. Gash, and C. Nobre, Ecosystem Sustainability and Poverty Alleviation in the Amazonia/Andes Region: A Preliminary Scientific Framework for Catalyzing System Changes, International Scientific Conference “Amazon in Perspective: Integrated Science for a Sustainable Future”, Manaus, Brazil, November 17—20, 2008.

Poveda, G. Cambio Climático y Salud Pública. Caso de la Malaria en Colombia, Simposio Colombiano de Ambientes Urbanos y Salud Pública, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Octubre 29 y 30 de 2008

Poveda, G., Cambio Climático y Cambio Global en Colombia: Una Reflexión Hidrológica con Énfasis en la Humedad del Suelo, Conferencia Magistral, XIV Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Villavicencio, Octubre 29 a 31 de 2008.

Poveda, G., L. F. Carvajal, A. Ochoa, and J. I. Vélez, Assessment of diverse monthly mean streamflow forecasting models involving macro-climatic indices and hydrologic persistence in Colombia, “HYDRO PREDICT 2008 - International and Interdisciplinary Conference on Predictions for Hydrology, Ecology, and Water Resources Management”, Praga, República Checa, 15 a 18 de septiembre de 2008.

Poveda, G., Suramérica Tropical: Forzantes Climáticos en Distintas Escalas Espacio-Temporales, Seminario sobre Precipitación y Fenómenos Meteorológicos asociados en Iberoamérica, Ourense, España, 8 a 10 septiembre de 2008.

Salazar, J. F., y G. Poveda, Interpretaciones Físicas del Escalamiento Espacial de Crecientes en la Cuenca del Río Amazonas. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, Septiembre 2008.

J. I. Hernández, G. Poveda, y J. I. Vélez, Respuesta Hidrográfica de la Desagregación Espacial y Espacio-Temporal de la Precipitación Tropical. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, Septiembre 2008.

Alvarez, O. D., J. I. Vélez, y G. Poveda, Nuevos Campos de Precipitación Promedia anual para Colombia. XXIII

Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, Septiembre 2008.

Álvarez, O. D., J. I. Vélez, y G. Poveda, Incertidumbre asociada con el Balance Hídrico de Largo Plazo. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, Septiembre 2008.

Acevedo, L. A., y G. Poveda, Comparación de Series de Precipitación con los GCM CCSM3, ECHAM5, HADGEM1 y MIROC 3.2 para el Siglo XX en Colombia. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, Septiembre 2008.

Bedoya, J. M., y G. Poveda, Aplicación de la Distribución Generalizada de Pareto para la Detección de Colas Pesadas en Caudales Máximos de Ríos del Amazonas y en la Zona Andina de Colombia. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, Septiembre 2008.

Ochoa, A., y G. Poveda, Distribución Espacial de Señales de Cambio Climático en Colombia, XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, Septiembre 2008.

Poveda, G., Climate variability and Health: Malaria. Changing Environment and Emerging Infectious Diseases (CEED) Retreat, Whitney Laboratory, University of Florida, St. Augustine, Florida, August 7-8, 2008.

Alvarez, O. D., J. I. Velez, and G. Poveda, Using TRMM data for annual average precipitation fields estimations in Colombia, Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, ERAD 2008, Helsinki, Finland, 2008.

Don Germán Poveda también ha participado en los siguientes programas de Investigación:

- 2006-2009: Investigador Principal: “PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA EN COLOMBIA”, financiado por Colciencias. a través de los “Programas Estratégicos de Investigación”, en el tema “Manejo Integral de Agua”.
- 2008-2009: Investigador Principal. Proyecto de investigación “Efectos del cambio climático en la hidrología colombiana con énfasis en eventos mínimos”. Financiado por DIME, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- 2008-2009: Investigador Principal: “Impacto del cambio climático sobre la lluvias en Colombia”. Financiado por Colciencias y CNPq de Brasil.

- Co-Investigador del Proyecto titulado “Red piloto de información hidrometeorológica para el Valle de Aburrá”. Investigador Principal: José Fernando Jiménez. Financiado por el DIME. Presupuesto: 15 millones. Varias Escuelas de varias Facultades de la Sede Medellín
- Co-Investigador: “Diseño y montaje de un sistema piloto para la detección de la inversión térmica en el Valle de Aburrá”, Financiado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Don Germán Poveda ha publicado numerosos artículos científicos, citamos los publicados en revistas indexadas internacionales en idioma diferente al español:

Morales, J. E., and G. Poveda (2009), Diurnally driven scaling properties of Amazonian rainfall fields: Fourier spectra and order- q statistical moments, *Journal of Geophysical Research*, 114, D11104, doi:10.1029/2008JD011281.

Hurtado, A. F., and G. Poveda (2009), Linear and global space-time dependence and Taylor hypotheses for rainfall in the tropical Andes, *Journal of Geophysical Research*, 114, D10105, doi:10.1029/2008JD011074.

Restrepo, C., L. R. Walker, A. B. Shiels, R. Bussmann, L. Claessens, S. Fisch, P. Lozano, G. Negi, L. Paolini, G. Poveda, C. Ramos-Scharrón, M. Richter, and E. Velázquez (2009), Landsliding and its multi-scale influence on mountainscapes, *Bioscience*. En imprenta.

Nobre, C. A., G. Obregón, J. Marengo, R. Fu, and G. Poveda (2009), Characteristics of Amazonian Climate: Main Features, *AGU Geophys. Monogr. Ser.*, 2009, doi:10.1029/2008GM000720. En imprenta.

Aceituno, P., M. Prieto, M. E. Solari, A. Martínez, and G. Poveda (2009), The 1877-78 El Niño episode: Climate anomalies in South America and associated impacts. *Climatic Change*, Vol. 92, No. 3-4, 389–416, February 2009. DOI: 10.1007/s10584-008-9470-5.

Salazar, J. F., and G. Poveda, Role of a Simplified Hydrologic Cycle and Clouds in Regulating the Climate-Biota System of Daisyworld. *Tellus 61B*, 483–497, 2009.

Don Armando Espinosa, en representación de la Academia, y por delegación del Consejo Directivo del Centro Regional de Sismología de Suramérica –CERESIS, está encargado de elaborar una propuesta para desarrollar un catálogo de terremotos para América del Sur. Este año Don Armando Espinosa viajó a presentar la propuesta al grupo

de Milán (U. de Milán – Instituto de Vulcanología y Sismología) para desarrollarla conjuntamente con el apoyo de la Unión Europea, como un componente de un programa mundial.

Dentro del rubro de proyectos especiales de la Academia se encuentra el diplomado de “La Ciencia en tu Escuela”, en colaboración con la Academia de Ciencias de México. El programa ya está estructurado. El presidente encargó de la coordinación a Doña Inés Bernal pero Don Jaime Rodríguez colabora muy de cerca. Se elaboró un plegable y un anexo con detalles de los módulos del diplomado en ciencias. El 3 de agosto, Don Jaime Rodríguez Lara y Doña Inés Bernal, presentaron el programa al Programa de Magíster, de la Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional. Se está estudiando la posibilidad de colaboración.

Del 19 al 25 de julio de 2009 se llevó a cabo en Tlaxcala, México, un campamento de verano convocado por IANAS y la Academia de Ciencias de México. Esta reunión convocó a profesores latinoamericanos que usan metodología ECBI. La Academia sirvió de intermediaria en la participación de la profesora Doña Yudy Carrillo.

COMITÉS

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales cuenta con comités y grupos de trabajo internos, participa en comités y grupos externos a través del Presidente o sus delegados. Estos y otros grupos permanentes u ocasionales propenden por el mejoramiento del nivel de la investigación y de la calidad de la enseñanza de las ciencias y participan en el cumplimiento de su función como órgano consultivo del gobierno.

La Comisión Permanente de Parques, constituida por Don Julio Carrizosa, Don Jhon Lynch y Don Gonzalo Andrade, mantiene un contacto permanente con la Unidad de Parques del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial”.

El Comité de Educación para el mejoramiento de la enseñanza de las ciencias, es coordinado por Doña Inés Bernal de Ramírez y constituido además por Doña Margarita Perea, Don Carlos Corredor Pereira, Don Jaime Rodríguez Lara y Don José A. Lozano. Las actividades que se desarrollan dentro de los programas de Educación en Ciencias y Aguas de IANAS, constituyen parte de las actividades desarrolladas por este comité, así como las actividades desarrolladas dentro del programa “La ciencia en tu Escuela”, en convenio con la Academia de Ciencias de México.

APOYO A EVENTOS

La Academia apoyó la realización de los siguientes eventos:

- Entre el 26 y 27 de enero de 2009 se desarrolló el taller latinoamericano en evaluación con el objetivo de compartir prácticas, metodologías, instrumentos y resultados de los procesos de evaluación de los proyectos ECBI de Latinoamérica. Asistieron siete países. El taller se realizó en las universidades de los Andes y Nacional y se clausuró en las instalaciones de la Academia. Parte de esta actividad estuvo financiada por FEMCIDI y por IANAS.
- Taller de Aprendizaje Activo de Óptica y Fotónica, ALOP Bogotá, realizado del 22 al 27 de junio en Bogotá, en la Universidad Nacional, dirigido especialmente a profesores de secundaria.
- I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración Ecológica. realizado en la ciudad de Bogotá entre el 27 y el 31 de julio de 2009.
- XVII Congreso Colombiano de Matemáticas, realizado del 3 al 6 de agosto de 2009, en la ciudad de Cali.
- XXIII Congreso Nacional de Física que se realizará del 5 al 9 de octubre/2009, en la ciudad de Santa Marta.

BIBLIOTECA LUIS LÓPEZ DE MESA

La Academia mantiene su biblioteca “Luis López de Mesa”. Sus volúmenes se incrementan principalmente a través del canje que recibe por las publicaciones propias y donaciones de diferentes fuentes. La Academia adquiere, por compra, únicamente tres títulos de revistas científicas (Science, Nature y Scientific American). Se pueden consultar electrónicamente 13.384 registros de libros y las referencias bibliográficas de todos los artículos publicados hasta ahora en la Revista de la Academia y 2.214 títulos de publicaciones seriadas.

PUBLICACIONES

Se publicaron y distribuyeron los números No. 124, 125 y 126 de la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

La lista de distribución y canje de la Revista cuenta con 464 direcciones así: 199 en Colombia, 117 en América y 148 en Europa y resto del mundo.

Tomando como referencia el Volumen XXXI (Números 118-121) del 2007 y el volumen XXXII (Números 122-125) de 2008, se recibieron y se evaluaron en total 142 artículos, se rechazaron 50 y fueron publicados 92 con lo que la revista tiene un porcentaje de rechazo cercano al 33%.

En lo corrido del año 2009 se han publicado los números 126 y 127 correspondientes al volumen XXXIII de 2009 por lo que la revista se encuentra perfectamente al día. La revista puede ser consultada en línea en forma libre a través de la página de la academia:

<http://www.accefyn.org.co/revista/index.htm>

La revista de la academia se encuentra clasificada como B en Publindex.

<http://scienti.colciencias.gov.co:8084/publindex/EnRevista/search.do>

y se encuentra en la base de datos de EBSCO:

<http://www2.ebsco.com/es/es/productsservices/atoz/Pages/index.aspx> como fuente académica *Full Text*.

Actualmente se lleva a cabo el trabajo para incorporarla a la base de datos SciELO:<http://www2.ebsco.com/es/es/productsservices/atoz/Pages/index.aspx> con lo que podría ser indexada en la categoría A de Publindex en la próxima re-indexación.

Se publicó el libro “Fundamentos de Limnología Neotropical” 2da. edición, de los académicos Gabriel Roldan Pérez y John Jairo Ramírez Restrepo, en convenio con la Universidad de Antioquia y la Universidad Católica de Oriente.

Se publicó el libro “Tendencias y Futuro de la Investigación en Parasitología y en Productos Naturales” que recoge las presentaciones de los científicos nacionales y extranjeros, los comentarios y resultados de las mesas de trabajo que siguieron a las presentaciones del Primer Seminario Internacional sobre Parasitología y Productos Naturales, realizado en la Universidad de los Andes, por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, ACCEFYN y la Asociación Colombiana de Facultades de Ciencias, ACOFACIEN, en Bogotá los días 4 a 6 de agosto de 2008.

GACETA Y PÁGINA ELECTRÓNICA

En el año se elaboraron, 1 número sencillo y cinco dobles del órgano divulgativo “Gaceta”, editado por Don Víctor Albis. Se distribuyeron en formato digital.

Se contrató a Don Carlos William Sánchez, como web master de la página de la Academia que está siendo rediseñada y contendrá información sobre la Biblioteca, los libros publicados, la revista y la Gaceta en formato electrónico, entre otras informaciones.

Reconocimiento a Académicos

Don Gabriel Poveda y Don Felipe Guhl, obtuvieron los Premios de la ACAC, en las categorías de: Vida y Obra e Investigador de Excelencia respectivamente.

Don Germán Poveda fue designado por el Consejo Superior de la Universidad de Antioquia en representación de las personalidades eminentes de la ciencia, la tecnología y la cultura; ante la Junta Rectora de la Fundación Universidad de Antioquia. Abril 28 de 2009 y designado por el Alcalde de Medellín Alonso Salazar Jaramillo, como miembro del Consejo Asesor del Parque Explora.

José A. Lozano
Secretario

