

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXII

MARZO DE 2008

NÚMERO 122

DIRECTOR DE LA REVISTA: PEDRO PRIETO



## CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
<b>Bioquímica (Biochemistry)</b>		<b>Química (Chemistry)</b>	
Prediction of transmembrane segments for the monomeric subunits of the ionotropic glutamate receptor activated by N-methyl-D-aspartate. [Predicción de la secuencia de los segmentos transmembranales de las subunidades monoméricas del receptor ionotrópico de glutamato activado por N-metil-D-aspartato] <i>Leonardo R. Lareo &amp; Carlos Corredor</i> .....	5	Adsorción catalítica simultánea de NO y SO <sub>2</sub> sobre carbonos activados [Simultaneous catalytic adsorption of NO and SO <sub>2</sub> over activated carbons] <i>Diana López, Robison Buitrago &amp; Fanor Mondragón</i> .....	67
<b>Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)</b>		<b>Zoología (Zoology)</b>	
Rocas volcánicas cenozoicas en la región del Cerrejón, Serranía de Perijá, Departamento de la Guajira, Colombia [Cenozoic volcanic rocks in Cerrejón area, Perijá Range, Guajira Department Colombia] <i>Jaime Galvis Vergara, Alcides Huguett Granados &amp; Javier Pomares A.</i> .....	15	Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en un nacimiento de Río en el Páramo de Santurbán, Norte de Santander [Diversity of aquatic macroinvertebrates in a headwater stream in the Moorland of Santurbán, Norte de Santander] <i>Pablo Manuel Castellanos &amp; Clemencia Serrato</i> .....	79
Insolation at the earth's surface [Insolación en la superficie de la tierra] <i>Joaquín Pelkowski</i> .....	25	<i>Osteocephalus Planiceps</i> cope (Amphibia: Hylidae): its distribution in Colombia and significance [ <i>Osteocephalus planiceps</i> Cope (Amphibia: Hylidae): su distribución en Colombia y su significado] <i>John D. Lynch</i> .....	87
<b>Genética (Genetic)</b>		Lowland reptiles of Yacopí (Cundinamarca, Colombia) [Reptiles de tierras bajas de Yacopí (Cundinamarca, Colombia)] <i>Rafael Ángel Moreno-Arias, Guido Fabián Medina-Rangel &amp; Olga Victoria Castaño-Mora</i> .....	93
The complete nucleotide sequence of the genomic RNA of <i>Bean common mosaic virus</i> strain NL4 [La secuencia nucleotídica completa del ARN genómico del Virus del mosaico común del frijol ( <i>Bean common mosaic virus</i> ) cepa NL4] <i>Enrique Bravo, Lee A. Calvert &amp; Francisco J. Morales</i> ...	37	Estudio de emergencia de insectos acuáticos en las zonas de bosque ripario, bosque plantado y pastos, Abejorral (Antioquia, Colombia) [Emergency study of aquatic insects in riparian and planted forest and in grassland (Abejorral, Antioquia, Colombia)] <i>Juan Camilo Rúa-Rivillas &amp; Gabriel Roldán-Pérez</i> .....	105
<b>Matemáticas (Mathematics)</b>		<b>Constitución de la Academia</b> (Members of the Academy).....	125
Comportamiento en el infinito de las soluciones de una clase abstracta de ecuaciones de evolución [Behaviour at infinity of solutions of an abstract class of evolution equations] <i>Gilberto Arenas Díaz, Henry Lamos Diaz &amp; Elder Jesús Villamizar Roa</i> .....	47	<b>Publicaciones de la Academia</b> (Publications of the Academy).....	127
Función de distribución para la n-ésima partícula más próxima en una colección al azar [Distribution function for the nth-nearest-neighbor particle in a random collection] <i>Cacier Z. Hadad &amp; Franklin Ferraro</i> .....	61		

# PREDICTION OF TRANSMEMBRANE SEGMENTS FOR THE MONOMERIC SUBUNITS OF THE IONOTROPIC GLUTAMATE RECEPTOR ACTIVATED BY N-METHYL-D-ASPARTATE

by

Leonardo R. Lareo<sup>1</sup> & Carlos Corredor<sup>2</sup>

## Abstract

**Lareo, L. R. & C. Corredor:** Prediction of transmembrane segments for the monomeric subunits of the ionotropic glutamate receptor activated by N-methyl-D-aspartate. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **32**(122): 5-13, 2008. ISSN 0370-3908.

The elucidation of transmembrane spanning domain structure is still a challenging experimental problem in protein chemistry. Several important proteins belong to the membrane protein group from which we have chosen the ionotropic glutamate receptor activated by N-methyl-D-aspartate as the subject of our work. This heteromeric protein has a broad range of important physiological functions and seems to be involved in pathological entities. A better knowledge of its sequence and possible structure may help understand its different physiological roles and might be useful for the design of drugs to treat disorders in which it is involved. The present work predicts the sequence of the transmembrane spanning segments of the different receptor subunits using different available algorithms. It compares the predictions obtained with the few published experimentally determined segments, finding good agreement between them.

**Key words:** transmembrane domains prediction, ionotropic glutamate receptor sensible to N-Methyl-D-aspartate, protein structure prediction, receptor.

## Resumen

La determinación de los dominios proteicos transmembranales sigue siendo un problema no completamente resuelto dentro de la química de las proteínas. Al grupo de proteínas de membrana pertenecen importantes estructuras entre las que se encuentra el receptor ionotrópico de glutamato

<sup>1</sup> Pontificia Universidad Javeriana. School of Sciences. Department of Nutrition and Biochemistry. Computational and Structural Biochemistry and Bioinformatics. Correo electrónico: l.lareo@javeriana.edu.co Bogotá, Colombia, S. A.

<sup>2</sup> Pontificia Universidad Javeriana. School of Sciences. Department of Nutrition and Biochemistry. Computational and Structural Biochemistry and Bioinformatics. Correo electrónico: ccorredo@javeriana.edu.co

activado por N-metil-aspartato, tópico del presente trabajo. Esta proteína multiheteromérica se encuentra involucrada en importantes eventos fisiológicos, así como en muchas entidades patológicas. Una mejor comprensión de las propiedades de su secuencia y de su estructura ayudarán para una mejor comprensión de sus distintos roles y para unas mejores aproximaciones en el diseño de drogas para tratar los desordenes en los que está involucrado. En el presente trabajo se predicen las secuencias que hacen parte de todas las regiones transmembranales de las diferentes subunidades constituyentes del receptor por medio de diversos algoritmos para finalmente generar una predicción de consenso. Se comparan las predicciones con los pocos datos experimentales previamente publicados encontrándose una alta calidad de las predicciones.

**Palabras clave:** predicción, dominios transmembranales, receptor ionotrópico de glutamato activado por N-metil-D-aspartato, estructura protéica, receptores.

## Introduction

Most functional membrane proteins have one or more transmembrane segments whose function ranges from simply anchoring the protein to the membrane, as in Class I proteins, to forming ion channels that may open or close upon electrical potential changes. The ionotropic glutamate receptor activated by N-methyl-D-aspartate (iGluR-NMDA) is such a membrane protein.

iGluR-NMDA belongs to the ionotropic receptors family that has three functionally different types:  $\alpha$ -amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazole propionate receptors (AMPA), high-affinity kainate receptors and N-Methyl-D-Aspartate (iGluR-NMDA) receptors.

iGluR-NMDA is a heteromeric subunits assembly (Hawkins *et al.*, 1999; Kashiwagi *et al.*, 1997), but it is still unclear whether it is tetrameric or pentameric (Laube *et al.*, 1998; Rosemund *et al.*, 1998; Ferrer-Montiel & Montal, 1996). It is differentially distributed throughout the CNS (Nusser, 2000) and it has been shown to mediate the fast synaptic action of the major excitatory neurotransmitter, L-glutamate (Cochilla & Alfors, 1999). These receptors are multimodulated. Glycine (Hirai *et al.*, 1996), polyamines (spermine and spermidine) (Kashiwagi *et al.*, 1997), histamine and, under some conditions, cations (McBain & Mayer, 1994; Paoletti *et al.*, 1997) can act as positive modulators. NMDA receptors are coupled to high conductance cationic channels permeable to  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$  and  $\text{Na}^{+}$  ions. (Cushing *et al.*, 1999).

These macromolecular functional receptor complexes in CNS are constituted by three major subunit families: NR1, NR2, and NR3 (Blahos & Wenthold, 1996; Hawkins *et al.*, 1999). Alternative splicing generates eight isoforms for the NR1 subfamily that have been identified in rat brain. Three of them have also been identified in human neural tissue (Nakanishi *et al.*, 1992). The NR2 subfamily consists of four individual subunits, NR2A to NR2D (Briecombe *et al.*, 1997).

The NR3 subfamily consists of two individual subunits, NR3A and NR3D (Andersson *et al.*, 2001).

Heteromeric NMDA receptor channels made up of a combination of NR1 and NR2/NR3 subunits are known to differ in physiological and pharmacological properties (Arden *et al.*, 1998; Honer *et al.*, 1998).

This work shows an *in silico* prediction for the transmembrane spanning segments for all fourteen monomeric subunits that can assemble in three to seven subunit groups to build the heteromeric iGluR-NMDA identified in rat brain.

Determination of membrane proteins structures is still at the edge of structural biology. Fully resolved three-dimensional structures at high resolution are available for a few – just about 50 - independent integral membrane protein from a total of about 19000 structures reported in the data bank. This is a mere 0.3% (Berman *et al.*, 2000). Given the scarcity of tertiary structure information, other experimental methods have been used to determine the membrane domains topology (Jennings 1989) which includes analyses of gene fusion proteins and studies of biochemically modified membrane proteins (Traxler *et al.*, 1993). These methods have only added to the list another few resolved membrane protein structures (Arora & Tamm 2001).

Theoretical prediction algorithms which take primary structure alone into account have been shown to be important in detecting membrane-spanning segments. Early work in this field primarily addressed the identification of transmembrane segments in the chain. Later work attempted not only to identify transmembrane domains within the sequence but to determine what is their orientation and topology with respect to the membrane they transverse.

By definition, transmembrane domains are protein segments which span a cytoplasmic membrane and are therefore exposed to the hydrophobic and low dielectric constant membrane interior. This means that the segment

must itself be hydrophobic in order to have an energetically favorable conformation. The first transmembrane domain prediction methods still widely used exploit Kyte's & Doolittle's (Kyte & Doolittle 1982) hydrophathy index. Eisenberg *et al.* (Eisenberg *et al.*, 1982) later introduced the helical hydrophobic moment concept that expanded Kyte's & Doolittle's hydrophathy summation to include a directional coefficient, thereby adding orientation of the amino acid within a helix to the measure of hydrophathy. A similar approach has been taken by Rao & Argos (Rao & Argos 1986), who consider residues that break the transmembrane helices to improve the reliability of the predictions. In the beginning of 1990's, von Hiejne (von Hiejne 1992) described a conserved region of positively charged amino acids found on the cytoplasmic side of transmembrane domains that provide the basis for a new predictive method that integrated hydrophathy analysis with information assessment of the positive inside rule to locate transmembrane domains and assign an orientation or topology to these domains.

Complex, data trained, software algorithms are the basis for most of the more recent transmembrane domain prediction methods. Rost & Sander (Rost & Sander 1994) created a neural network system which was trained to recognize both the positive right hand rule and regions of high hydrophobicity and, from that data, make transmembrane domain prediction. This generates a group of so-called PHDhtm programs to produce the final transmembrane predictions (Rost, 1996).

Cserzo *et al.* (Cserzo *et al.*, 1997) developed the dense alignment surface method (DAS) to improve weaknesses of the PHDhtm program. The DAS profile averages individual cumulative score profiles, calculated from pair comparisons of non-redundant, transmembrane proteins with known topology.

Another approach is the use of Hidden Markov Models. The advantage of this type of method is that it predicts both the domain regions and their topology. (Krogh *et al.*, 2001; Tusnady & Simon 1998).

Two recently published independent evaluations have examined a large amount of transmembrane prediction methods. Both papers agree that currently used prediction methods provide good quality results with up to 85% success in transmembrane helices predicted correctly (Moller *et al.*, 2001; Chen & Rost 2002).

## Materials and methods

### Selection of rat iGluR-NMDA sequences

The following sequences were selected from more than 70 sequences deposited in the Gene Bank at NCBI.

Nomenclature used is an adaptation of Hollman's (Hollman 1999) proposal for nomenclature. For isoform NR1-1a, **GI:475554**; for NR1-1b, **GI:475558**; for NR1-2a, **GI:475556**; for NR1-2b, **GI:475560**; for NR1-3a, **GI:475562**; for NR1-3b, **GI:475564**; for NR1-4a, **GI:475566**; for NR1-4b, **GI:475568**; for NR2A, **GI:2155310**; for NR2B, **GI:205739**; for NR2C, **GI:205735**; for NR2D, **GI:475552**; for NR3A, **GI:5305435**, and for NR3B, **GI:20376816**. Criteria for selection were: minimal inconsistencies, complete reports and complete annotated registration.

### Transmembrane spanning segment prediction algorithms

The following eight programs were selected from a broad range of transmembrane prediction algorithms on the basis of published quality evaluations (Moller *et al.*, 2001; Chen & Rost 2002): DAS from Stockholm University (Cserzo *et al.*, 1997); HMMTOP from the Hungarian Academy of Sciences (Tusnady & Simon 2001); SOSUI from Tokyo University of Agriculture & Technology (Mitaku *et al.*, 2002); TMHMM from the Center for Biological Sequence Analysis in Denmark (Krogh *et al.*, 2001); TMPred from EMBnet (Hoffmann & Stoffel 1993); TopPredII from Stockholm University (Claros & von Heijne 1994); SMART from EMBL (Letunic *et al.*, 2002) and SAPS from ISREC (Brendel *et al.*, 1992). The number of transmembrane segments was predicted with each of the eight programs selected. The topology was determined by knowledge of the total receptor orientation (Whitehorn *et al.*, 1999; Sprengel *et al.*, 1998). There was close agreement about the number, but not so, about the length of each of the predicted segments. To overcome this difficulty, we aligned the eight predicted segments using the program ClustalW from EBI (Higgins *et al.*, 1994) to obtain a consensus sequence. The results were confirmed using DIALING from University of Bielefeld (Abdeddaïm & Morgenstern 2001). This process was repeated for each segment of every subunit so as to obtain complete predictions for the 14 subunits selected.

## Results

### Number of predicted transmembrane spanning segments

The total number of transmembrane segments predicted was fifty. Three transmembrane segments were predicted for all eight isoforms of NR1 and for the two NR3 subunits. For NR2 subunit types, five transmembrane segments were identified. Analysis of the eight NR1 transmembrane segment sequences (TMSS) showed that they could be grouped in two clusters. The three TMSS were identical

within the four isoforms in each of the two clusters. For this reason, in the rest of the paper we will consider only two TMSS, 1a and 1b, for the NR1 subunits.

In Table 1 data obtained for the predicted TMSS is shown. The topology is surmised from the well documented fact that the N-terminal is extracellular and the C-terminal is intracellular.

### Comparison of predicted transmembrane segments

When TMSS of the same relative location within the protein are compared among themselves they show strong similarities. We only found some minor amino acid substitutions in the five transmembrane segments of the NR2 subunits with some semi-conservative changes. The same is true for the three TMSS of NR3 subunits. However, if we align the five NR2, the three NR3 or the three NR1 TMSS, no homology between them is found, as should be expected if they represent different segments which contribute to the final protein structure.

Even though there is little homology between TMSS of the same subunit, there seems to be some conservative sequences in the segments which might have to do with its lipid environment. This conserved sequence is made up of 9-10 neutral or aromatic amino acids which seem to lie in the very middle of the overall TMSS amino acid sequence.

### Location of the transmembrane segment into the total subunit sequence

When the complete subunit sequences are aligned, a pattern emerges suggesting that the relative location of all TMSS within the overall chain seems to be highly conserved. This might imply a possible common origin for all subunits and it allows for the possibility of building three dimensional assemblies to form channels using different possible subunits with the right geometry for assembly.

Three dimensional ensembles of the TMSS to form channels depend on, at least, some physicochemical properties such as molecular weight, difference in surface charge, capacity to bind water molecules and differences between charged and nonpolar residues around the axis of the segment. These properties were calculated and they are shown in table 2.

## Discussion

### Quality of transmembrane segment prediction

There are few published experimental data on TMSS. Radistch *et al.* (Radistch *et al.*, 1993) extracted and sequenced the second transmembrane segments of NR2A

and NR2C subunits obtained from rat brain. We predict here the TMSS for the second segments of NR2A and NR2C subunits. The predicted TMSS show a similarity score with the experimental ones higher than 95% as shown in Table 3 where results of ClustalW alignments are presented. These findings allow us to suggest that similar scores might be found for other TMSS predicted here.

Senes *et al.* (Senes *et al.*, 2000) and Liu *et al.* (Liu *et al.*, 2002) recently reported a large statistical analysis of transmembrane segments of nearly 13,000 sequences. They found a pattern in the distribution of amino acid residues in the segments considered. In Figure 1 we show the amino acid distribution in our predicted segments. Even though our sample is small in comparison, it shows similar pattern

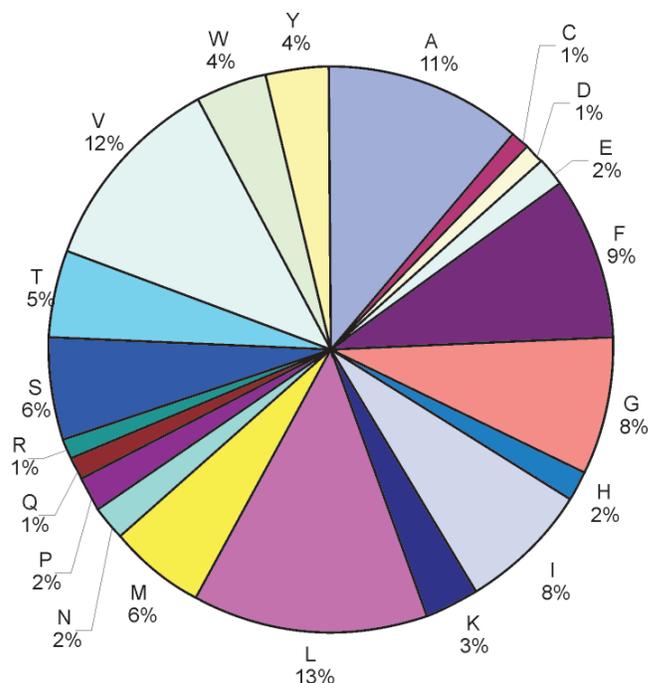


Figure 1. Amino acid composition of predicted TMSS.

distribution as the one found by Senes (Senes *et al.*, 2000) and Liu (Liu *et al.*, 2002).

The following patterns are apparent from the figure. Only four amino acids (L, V, A, F) represent close to one half of the transmembrane residues, while only six amino acids (L, V, A, F, G, I) correspond to two-thirds of the total. The most abundant 2-tuples are AX, VX, LX, IX which represent 15.0%; 14.5%; 10.0% and 6.0% respectively of the total 400 possibilities. VF and LV are close to a third of all VX and LX (5.8%), while IF is half of the IX (3.5%) and AA and AV are each a fifth of AX

**Table 1.** Sequences, length, topology and localization into the total precursor monomeric subunit sequence for the transmembrane segments predicted.

Subunit	TMSS	Topology	Sequence-Localization	Length
NR1-1a	1	o → i	T <sup>561</sup> LWLLVGLSVHVAVMLYLLD <sup>581</sup>	21
	2	i → o	L <sup>632</sup> GMVWAGFAMIIVASYTANLAAFLVL <sup>657</sup>	26
	3	o → i	M <sup>813</sup> AGVFMLVAGGIVAGIFLIFIEIAY <sup>837</sup>	25
NR1-1b	1	o → i	T <sup>582</sup> LWLLVGLSVHVAVMLYLLDR <sup>603</sup>	21
	2	i → o	L <sup>653</sup> GMVWAGFAMIIVASYTANLAAFLVL <sup>678</sup>	26
	3	o → i	M <sup>834</sup> AGVFMLVAGGIVAGIFLIFIEIAY <sup>858</sup>	25
NR2A	1	o → i	S <sup>554</sup> ASVWVMMFVMLLIVSAIAVFVFEYF <sup>579</sup>	26
	2	i → o	P <sup>594</sup> HGPSFTIGKAIWLLWGLVFNNVSPVQ <sup>620</sup>	27
	3	o → i	S <sup>627</sup> KIMVSVWAFFAVIFLASYTANLAAFMIQ <sup>655</sup>	29
	4	i → o	K <sup>746</sup> LVTIGSGYIFATTGYGIALQKGPWKRQID <sup>776</sup>	31
	5	o → i	M <sup>817</sup> AGVFYMLAAAMALSLITFIWEHLFYWCLR <sup>836</sup>	30
NR2B	1	o → i	A <sup>555</sup> ADVWVMMFVMLLIVSAVAVFVFEYF <sup>580</sup>	26
	2	i → o	P <sup>595</sup> GGPSFTIGKAIWLLWGLVFNNVSPVQ <sup>621</sup>	27
	3	o → i	S <sup>628</sup> KIMVSVWAFFAVIFLASYTANLAAFMIQ <sup>656</sup>	29
	4	i → o	K <sup>747</sup> LVTIGSGKVFFASTGYGIAIQKDSGWKRQVD <sup>777</sup>	31
	5	o → i	A <sup>819</sup> GVFYMLGAAMALSLITFICEHLFYWQFRH <sup>848</sup>	30
NR2C	1	o → i	S <sup>552</sup> PAVWVMMFVMMCLTVVAITVFMFEYF <sup>577</sup>	26
	2	i → o	P <sup>592</sup> GGPSFTIGKSVWLLWALVFNNVSPVQ <sup>618</sup>	27
	3	o → i	S <sup>625</sup> KIMVLVWAFFAVIFLASYTANLAAFMIQ <sup>653</sup>	29
	4	i → o	K <sup>744</sup> LVTIGSGKVFATTGYGIAMQKDSHWKRAID <sup>774</sup>	31
	5	o → i	A <sup>816</sup> GVFYMLLVAMGLALLVFAWEHLVYWCLR <sup>845</sup>	30
NR2D	1	o → i	S <sup>579</sup> PAVWVMMFVMMCLTVVAITVVFIFEYL <sup>604</sup>	26
	2	i → o	P <sup>619</sup> GGSTFTIGKSIWLLWGLVFNNVSPVE <sup>644</sup>	27
	3	o → i	S <sup>652</sup> KIMVLVWAFFAVIFLASYTANLAAFMIQ <sup>680</sup>	29
	4	i → o	K <sup>771</sup> LVTIGSGKVFATTGYGIALHKGSRWKRPID <sup>801</sup>	31
	5	o → i	A <sup>843</sup> GVFYMLLVAMGLSLLVFAWEHLVYWRLRH <sup>872</sup>	30
NR3A	1	o → i	W <sup>674</sup> TMWLGIFVALHITAIFLTLY <sup>695</sup>	21
	2	i → o	F <sup>744</sup> LMNLWAIFCMFLSTYTANLAAVMVGE <sup>771</sup>	28
	3	o → i	F <sup>931</sup> SGLFVLLCIGFGLSILTTIGEHIY <sup>955</sup>	25
NR3B	1	o → i	W <sup>575</sup> SMWVGVFVAALHLTALFLTLY <sup>595</sup>	21
	2	i → o	F <sup>644</sup> LMNLWAIFCVLLSSYTANLAAVMVGD <sup>671</sup>	27
	3	o → i	F <sup>831</sup> SGLFVLLCIGLGSALLTSLGEHVF <sup>855</sup>	25

(3.3%). Notice that X in these cases are all hydrophobic residues. LLX and LVX are the most abundant 3-tuples found with LLV and LVF predominant. Finally, TIGX, AFXX, LVXX, VFXX were the greatest 4-tuples patterns found. All these data closely agree with the statistical reports cited above.

#### Conserved transmembrane spanning segments in the iGluR-NMDA subunits

From Tables 2 and 3 is evident that TMSS are highly conserved. In the case of the NR2 TM1's there is at least 70% identity and 80% positivity among them. Similar values can be found for the TM1's of the NR3 subunits. On the other hand, if all TMSS of a given subunit are considered, the similarity value is lower but it is still significant. This might imply that some topological arrangements are preferred in order to ensure the right pore conformation. The internal part of the pore is highly conserved as shown by the fact that nearly half of the

amino acids in the TMSS which probably make up the pore have a high level of similarity. However, this does not apply to the amino acids at the pore ends. This might explain why the different environments just outside the TMSS might control cation flux even though the pore's core has the same environment independent of the ion that goes through it.

This view is supported by the data presented in Table 2, where some characteristics of the predicted pore sequence are analyzed. Considering that values larger than 0.5 in the mean hydrophathy GRAVY scale are good indicators of transmembrane topology, the data show that predicted TMSS comply with this condition. A few of them present lower values which can be explained by the higher content of the hydrophilic residues conserved among the hydrophobic residues. This agrees with the values reported for the amphipathic moment which is a measure of the distribution asymmetry of hydrophobic and hydrophilic residues along its axes. A value near zero indicates relatively

**Table 2.** Physico-chemical data for the transmembrane spanning segments predicted for the iGluR-NMDA subunits.

Subunit/ Transmembrane segment	Molecular weight (Da)	pI	Mean hydrophathy (GRAVY)	Amphipathy moment
NR1-TM1	2355	3.43	1.93	0.01
NR1-TM2	2743	3.12	1.88	0.03
NR1-TM3	2616	3.10	2.23	0.04
NR2A-TM1	3001	3.10	2.15	0.03
NR2A-TM2	2979	3.77	0.47	0.05
NR2A-TM3	3241	3.50	1.49	0.03
NR2A-TM4	3370	4.13	-0.04	0.02
NR2A-TM5	3594	3.96	1.13	0.00
NR2B-TM1	2999	3.05	2.14	0.03
NR2B-TM2	2898	3.50	0.57	0.05
NR2B-TM3	3241	3.50	1.49	0.03
NR2B-TM4	3311	4.22	-0.19	0.01
NR2B-TM5	3537	3.90	0.98	0.00
NR2C-TM1	3063	3.10	1.88	0.02
NR2C-TM2	2929	3.47	0.56	0.04
NR2C-TM3	3267	3.50	1.65	0.04
NR2C-TM4	3380	4.46	-0.18	0.02
NR2C-TM5	3548	4.19	1.22	0.02
NR2D-TM1	2997	3.10	2.01	0.03
NR2D-TM2	2919	3.47	0.51	0.05
NR2D-TM3	3267	3.50	1.65	0.04
NR2D-TM4	3350	5.65	-0.16	0.02
NR2D-TM5	3592	4.19	1.11	0.01
NR3A-TM1	2510	3.50	1.68	0.04
NR3A-TM2	3161	3.10	1.40	0.01
NR3A-TM3	2650	3.47	1.80	0.06
NR3B-TM1	2440	3.50	1.50	0.03
NR3BTM2	2964	3.07	1.47	0.01
NR3B-TM3	2594	3.47	1.60	0.04

**Table 3.** Alignments of reported TM2 segments and predicted TMSS.

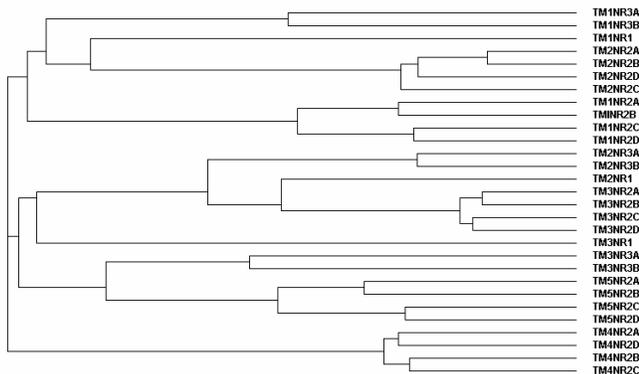
TM2NR2A-Predicted gij 385459 gb AAB27000.1	PGGPSFTIGKAIWLLWGLVFNNVSPVQ- —SFTIGKAIWLLWGLVFQNSVPVQN *****.*****
TM2NR2C-Predicted gij 385458 gb AAB26999.1	PGGPSFTIGKSVLLWALVFNNVSPVPIE- —SFTIGKSVLLWALVFQNSVPIEN *****.*****

homogeneous distribution while increasing values point to ever larger asymmetries. Segments with low hydrophathy present higher values of amphypatic moment that imply that the asymmetry is due to a higher presence of hydrophilic residues in the segment. The molecular weights reported are very close as was expected from sequence similarities among them. It should be noted the low values of pI, which imply an unexpected acidic membrane environment.

### Grouping of predicted TMSS

Taking into account the similarities between subunits discussed above, we did a clustering of the different subunits using the normal criteria for the ClustalW program and obtained figure 2.

When all the 29 transmembrane spanning segments were aligned with Clustal, the clustering obtained is similar to the grouping obtained by considering the physical and chemical characteristics only as shown in the Table 6. Notice that NR1 and NR3 subunit types tend to cluster together while NR2's form another cluster. The transmembrane segments appeared to show some interchangeability as a result of these properties.

**Figure 2.** Dendrograme of the transmembrane sequences of all the subunits showing their clustering in terms of global similarities.

This fact agrees with the proposal of Franciolini and Petris (**Franciolini & Petris 1989**) that calcium channels were first to appear during evolution due to the importance of this cation as a messenger and modulator for most cellular signaling processes. This can also be the reason for the presence of iGluR-NMDA subunits in many peripheral non excitable tissues where calcium is important for function as was described in the introduction to the present work.

### Acknowledgments

Financial support for this work was provided by grant No. 1428 from Pontificia Universidad Javeriana.

### References

- Abdeddaïm, S. & B. Morgenstern.** 2001. Speeding up the DIALIGN multiple alignment program by using the 'Greedy Alignment of BIOlogical Sequences LIBrary' GABIOS-LIB. Lecture Notes in Computer Science **2066**: 1-11.
- Andersson, O., A. Stenqvist, A. Attersand & G. von Euler.** 2001. Nucleotide sequence, genomic organization, and chromosomal localization of genes encoding the human NMDA receptor subunits NR3A and NR3B. *Genomics* **78**: 178-184.
- Arden, S. R., J. R., Sinor, W. K. Potthoff, & E. Aizenman.** 1998. Subunit-specific interactions of cyanide with the N-Methyl-D-Aspartate receptor. *J. Biol. Chem.*, **273**: 21505-21511.
- Arora, A. & L. K. Tamm.** 2001. Biophysical approaches to membrane protein structure determination. *Curr. Opin. Struct. Boil.* **11**: 540-547.
- Berman, H. M., J., Westbrook, Z., Feng, G., Gilliland, T. N., Bhat, H., Weissig, I. N. Shindyalov & P. E. Bourne.** 2000. The Protein Data Bank. *Nucleic Acids Research*, **28**: 235-242.
- Blahos, J. & R. J. Wenthold.** 1996. Relationship between N-methyl-D-Aspartate receptor NR1 splice variants and NR2 subunits. *J. Biol. Chem.* **271**: 15669-15674.
- Brendel, V., P., Bucher, I. R., Nourbakhsh, B. E. Blaisdell, S. Karlin.** 1992. Methods and Algorithms for Statistical Analysis of Protein Sequences. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **89**: 2002-2006.
- Briecombe, J. C., F. A. Boeckman & E. Aizenman.** 1997. Functional consequences of NR2 subunit composition in single recombinant N-Methyl-D-Aspartate receptors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **94**: 11019-11024.
- Chen, C. & B. Rost.** 2002. State-of-the-art membrane protein prediction. *Applied Bioinformatics* **1**: 21-35.
- Claros, M. G., & G. von Heijne.** 1994. TopPred II: An Improved Software For Membrane Protein Structure Predictions. *CABIOS* **10**: 685-686.
- Cochilla, A. J. & S. Alford.** 1999. NMDA receptor-mediated control of presynaptic calcium and neurotransmitter release. *J. Neuroscience* **19**: 193-205.

- Cserzo, M., E., Wallin, I., Simon, G. von Heijne & A. Elofsson.** 1997. Prediction of transmembrane alpha-helices in prokaryotic membrane proteins: the Dense Alignment Surface method. *Prot. Eng.* **10**: 673-676.
- Cushing, A., M. J., Price-Jones, R., Graves, A. J., Harris, K. T., Hughes, D. Bleakman & D. Lodge.** 1999. Measurement of calcium flux through ionotropic glutamate receptors using Cytostar-T scintillating microplates. *J. Neurosc. Meth.* **90**: 33-36
- Eisenberg, D., Weiss, R. M. & Trwilliger, T. C.** 1982. The helical hydrophobic moment: a measure of the amphiphilicity of a helix. *Nature* **299**: 371-374.
- Ferrer-Montiel, A. V. & Montal, M.** 1996. Pentameric subunit stoichiometry of a neuronal glutamate receptor. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **93**: 2741-2744.
- Franciolini, F. & A. Petris,** 1989. Evolution of ionic channels of biological membranes. *Mol. Biol. Evol.* **6**: 503-513.
- Hawkins, L. H., P. L. Chazot & F. A. Stephenson.** 1999. Biochemical evidence for the co-association of three N-methyl-D-aspartate NMDA. R2 subunits in recombinant NMDA receptors. *J. Biol. Chem.* **274**: 27211-27218.
- Higgins, D., J. Thompson, T. Gibson, J. D. Thompson, D.G. Higgins & T. J. Gibson** 1994. CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids Res.* **22**: 4673-4680.
- Hirai, H., J. Kirsch, B. Laube, H. Betz & J. Kuhse.** 1996. The glycine binding site of the N-methyl-D-aspartate receptor subunit NR1, identification of novel determinants of co-agonist potentiation in the extracellular M3-M4 loop region. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **93**: 6031-6036.
- Hoffmann, K. & W. Stoffel.** 1993. TMbase - A database of membrane spanning proteins segments. *Biol. Chem. Hoppe-Seyler* **374**: 166-168.
- Hollman, M.** 1999. Structure of ionotropic glutamate receptors. In: P. Jonas & Monyer, H., Eds. *Ionotropic glutamate receptors in the CNS*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 3-98.
- Honer, M., D. Benke, B. Laube, J. Kuhse, R. Heckendorn, H. Allgeiers, C. Angst, H. Monyer, P. T. Seeburg, H. Betz & H. Mohler.** 1998. Differentiation of glycine antagonist sites of N-methyl-D-Aspartate receptor subtypes. *J. Biol. Chem.* **273**: 11158-11163.
- Jennings, M. L.** 1989. Topography of membrane proteins. *Annu. Rev. Biochem.* **58**: 999-1027.
- Kashiwagi, K., A. J. Pahk, T. Masuko, K. Igarashi & K. Williams.** 1997. Block and modulation of N-methyl-D-aspartate receptors by polyamines and protons, role of amino acid residues in the transmembrane and pore-forming regions of NR1 and NR2 subunits. *Mol. Pharm.* **52**: 701-713.
- Krogh, A., B. Larsson, G. von Heijne & E. Sonnhammer.** 2001. Prediction of transmembrane protein topology with a Hidden Markov Model: Application to complete genomes. *J. Mol. Biol.* **305**: 567-580.
- Kyte, J. & R. F. Doolittle.** 1982. A simple method for displaying the hydrophobic character of a protein. *J. Mol. Biol.* **157**: 105-132.
- Laube, B., J. Kuhse, & H. Betz.** 1998. Evidence for a tetrameric structure of recombinant NMDA receptor. *J. Neuroscience* **18**: 2954-2961.
- Letunic, I., L. Goodstadt, N. J. Dickens, J. Doerks, J. Schultz, R. Mott, F. Ciccarelli, R. R. Copley, C. P. Ponting & P. Bork.** 2002. Recent improvements to the SMART domain-based sequence annotation resource. *Nucleic Acids Research* **30**: 242-244.
- Liu, Y., D. M. Engelmann & M. Gerstein.** 2002. Genomic analysis of membrane protein families: abundance and conserved motifs. *Genome Biol.* **3**: research0054.
- Mitaku, S., T. Hirokawa, & T. Tsuji.** 2002. Amphiphilicity index of polar amino acids as an aid in the characterization of amino acid preference at membrane-water interfaces. *Bioinformatics* **18**: 608-616.
- McBain, C. J. & M. L. Mayer.** 1994. N-Methyl-D-Aspartate receptor structure and function. *Physiol. Rev.* **74**: 723-760.
- Moller, S., M. Croning, & R. Apweiler.** 2001. Evaluation of methods for the prediction of membrane spanning regions. *Bioinformatics* **17**: 646-653.
- Nakanishi, N., R. Axel, & N. A. Shneider.** 1992. Alternative splicing generates functionally distinct N-methyl-D-aspartate receptors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **89**: 8552-8556.
- Nusser, Z.** 2000. AMPA and NMDA receptors, similarities and differences in their synaptic distribution. *Curr. Opin. Neurobiol.* **10**: 337-341.
- Paoletti, P., P. Ascher, & J. Neyton.** 1997. High-affinity zinc inhibition of NMDA NR1-NR2A receptors. *J. Neurosci.* **17**: 5711-5725.
- Raditsch, M., J. P. Ruppertsberg, T. Kuner, W. Gunther, R. Schoepfer, P. H. Seeburg, W. Jahn & V. Witzemann.** 1993. Subunit-specific block of cloned NMDA receptors by argitoxin636. *FEBS Lett.* **324**: 63-66.
- Rao, J. K. M. & P. Argos.** 1986. A conformational preference parameter to predict helices in integral membrane proteins. *Biophys. Biochem. Acta*, **869**: 197-214.
- Rosenmund, C., Y. Stern-Bach, & C. F. Stevens.** 1998. The tetrameric structure of a glutamate receptor channel. *Science* **280**: 1596-1599.
- Rost, B. & C. Sander.** 1994. Combining evolutionary information and neural networks to predict protein secondary structure. *Proteins* **19**: 521-533.
- Rost, B.** 1996. PHD: predicting 1D protein structure by profile based neural networks. *Meth. Enzymol.* **266**: 525-539.
- Senes, A., M. Gerstein & D. M. Engelmann.** 2000. Statistical analysis of amino acid patterns in transmembrane helices: The GxxxG motif occurs frequently and in association with b-branched residues at neighboring positions. *J. Mol. Biol.* **296**: 921-936.

- Sprengel, R., B. Suchanek, C. Amico, R. Brusa, N. Burnashev, A. Rozov, O. Hvalby, V. Jensen, O. Paulsen, P. Andersen, J. J. Kim, R. F. Thompson, W. Sun, L. C. Webster, S. G. N. Grant, J. A. Eilers, J. Konnerth, Li, J. O. McNamara & P. H. Seeburg.** 1998. Importance of the intracellular domain of NR2 subunits for NMDA receptor function in vivo. *Cell* **92**: 279-289.
- Traxler, B., D. Boyd, & J. Beckwith.** 1993. The topological analysis of integral cytoplasmic membrane proteins. *J. Membrane Biol.* **132**: 1-11.
- Tusnady, G. & I. Simon.** 1998. Principles governing amino acid composition of integral membrane proteins: Application to topology prediction. *J. Mol. Biol.* **283**: 489-506.
- Tusnady, G. E. & I. Simon.** 2001. The HMMTOP transmembrane topology prediction server. *Bioinformatics* **17**: 849-850.
- von Heijne, G.** 1992. Membrane protein structure prediction. Hydrophobicity analysis and the positive inside rule. *J. Mol. Biol.* **225**: 487-494.
- Whitehorn, E. A., W. J. Dower, & M. Li.** 1999. Expression of extracellular N-terminal domain of NMDA receptor in mammalian cells. *In*: Li, M. Ed. NMDA receptor protocols. Humana Press, Totowa, New Jersey. pp. 61-72.

Recibido: abril 15 de 2008

Aceptado para su publicación: mayo 8 de 2008

# ROCAS VOLCÁNICAS CENOZOICAS EN LA REGIÓN DEL CERREJÓN, SERRANÍA DE PERIJÁ, DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA, COLOMBIA

Por

**Jaime Galvis Vergara<sup>1</sup>, Alcides Huguett Granados, Javier Pomares A.**

## Resumen

**Galvis Vergara, J., A. Huguett Granados & J. Pomares A:** Rocas volcánicas cenozoicas en la región del Cerrejón, Serranía de Perijá, departamento de la Guajira, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(122): 15-23, 2008. ISSN 0370-3908.

En la información geológica referente a vecindades de las minas de carbón del Cerrejón, en el departamento de La Guajira, Colombia, hay menciones de una espesa secuencia de rocas metamórficas y sedimentarias, pertenecientes al lapso comprendido entre el precámbrico y el Cenozoico tardío. Las pocas referencias acerca de rocas magmáticas se refieren a vulcanitas del Jura-triásico.

Hay abundantes evidencias de un magmatismo Cenozoico al Este del cerro Cerrejón y al suroeste de en el cerro Majaguita.

**Palabras clave:** Cerrejón, vulcanismo, cenozoico.

## Abstract

In geological reports about the neighboring area of the Cerrejón coal mines, in Guajira department, Colombia, there are mentions of a thick sequence of metamorphic and sedimentary rocks, spanning since Precambrian to recent Neogene. The few references about magmatic rocks referred to Jura-triassic volcanics.

There are plenty of evidences of Cenozoic magmatism East of Cerrejón hill and to southwest in Majaguita hill.

**Key words:** Cerrejón, vulcanismo, cenozoico.

---

<sup>1</sup> Transversal 21 bis 3 61B-33. Correo electrónico: [jaime\\_galvis@yahoo.com](mailto:jaime_galvis@yahoo.com)

## Geomorfología

La serranía de Perijá es una cadena montañosa, con rumbo SW-NE, notablemente asimétrica, con un flanco de suave pendiente al Suroriente, en territorio de Venezuela; el flanco noroccidental en Colombia se presenta más abrupto.

La mencionada serranía limita al Noroeste con un valle, cuya anchura es poco mayor de 10 kilómetros, por donde transcurren en direcciones opuestas los ríos Ranchería (hacia el NE) y Cesar (hacia el SW); por el SE limita con la llanura del lago de Maracaibo.

Los drenajes de la Serranía de Perijá tienden a presentar patrones en trellis y subparalelos, lo cual junto con la presencia de iron flats, evidencia una predominancia de rocas estratiformes. Al Noroeste de esta serranía, se observa una cuchilla de poca altura, paralela a aquella, cuya eminencia topográfica más descollante es el cerro Cerrejón, el cual alcanza 648 metros sobre el nivel del mar (Anexo 2, Fotografía 1).

## Estratigrafía

La unidad más antigua de la región estudiada, corresponde a granitos migmatíticos y neises, característicos de la corteza síalica, los cuales han sido reportados por **Miller** (1962) y **Bowen** (1972) en el territorio vecino de Venezuela. Más recientemente **Ujueta & Llinás** (1992) describen brevemente la presencia de granitos en el flanco colombiano, señalan que “En el río Capuchino, un kilómetro al Sur de la confluencia con el arroyo Cañaverales, se encontraron rodados de granito rosado”. El sitio mencionado se ubica al Sur del cerro Cerrejón.

El Paleozoico se encuentra ampliamente representado en la Serranía de Perijá, aun cuando localmente, en vecindades de Cerrejón no se halla expuesto. La mayoría de los autores han hecho referencia a meta-sedimentos pre-devónicos sin especificar edades absolutas. **Ujueta & Llinás** se refieren a dos ventanas de unidades litológicas cambro-ordovicianas, situadas en dos localidades al Sur del cerro Cerrejón, sin mencionar que clase de datación realizaron.

La presencia del Devónico está ampliamente documentada en **Trumpy** (1943), **Liddle** (1943), **Miller** (1962), **Radelli** (1962), **Bowen** (1972) y **Forero** (1972). Según estos autores, las sedimentitas del Devónico son de composiciones pelítica y arenácea, con algunas intercalaciones calcáreas delgadas y discontinuas.

Respecto al Carbonífero, hay suficiente documentación, respecto a litología y edad, en especial en el flanco venezolano de la serranía.

Las referencias de **Trumpy** (1943), **Miller** (1962), **Bowen** (1972) y **Forero** (1972). Indican que el Carbonífero presenta en su base sedimentos detríticos, conglomerados, areniscas rojas, lutitas y algunas intercalaciones tobáceas, estas últimas descritas en **Bowen** (1972). A las unidades referidas les sobreyacen calizas y margas.

El Pérmico en la serranía de Perijá, presenta en la base sedimentitas arenáceas y pelíticas, a los cuales sobreyace una espesa secuencia de sedimentitas calcáreas con algunas intercalaciones arenáceas.

El Mesozoico, localmente en el área de Cerrejón, ha sido descrito por varios autores, los cuales lo han dividido en Jura-Triásico, compuesto de sedimentitas continentales y vulcanitas y Cretáceo compuesto de sedimentitas marinas.

El “Jura-triásico”, denominado así por hallarse sobre sedimentitas datadas del Pérmico e infrayaciendo unidades del Cretáceo, comprende un conjunto litológico deficientemente estudiado y muy poco entendido. Tradicionalmente ha recibido denominaciones tales como “Formación La Quinta” o “Formación Girón”. Estas denominaciones comprenden conglomerados, areniscas y arcillolitas rojas, intercaladas con rocas piroclásticas en una amplia variedad de texturas.

**Forero** (1972) subdividió la secuencia litológica del “Jura-triásico” en cuatro miembros: un miembro inferior compuesto de conglomerados y areniscas rojas, con intercalaciones de vulcanitas, un segundo miembro conformado por areniscas de color púrpura con algunas intercalaciones de lutitas, un tercer miembro constituido por lutitas alternando con rocas volcánicas y al tope conglomerados polimícticos lenticulares. El cuarto miembro o “Conjunto D” es descrito así: “Se compone exclusivamente de vulcanitas de quimismo ácido y por consiguiente deben denominarse como riolitas o sus tobas correspondientes”. Este cuarto miembro o “Conjunto D” de la “Formación La Quinta”, no parece tener relación con el resto de la secuencia mencionada por **Forero** (1972). En la descripción petrográfica presentada por **Ujueta & Llinás** (1992), parece lo siguiente: “Micrografía (sic) No. 5. A. = 3.5 Luz polarizada en dos direcciones” “Aspecto de las tobas riolíticas del Jurásico donde se observan pórfidos (sic) de feldespato potásico (K) ligeramente caolinizado, plagioclasas macladas polisintéticamente (P) y cuarzos (Q) en una matriz (M) de vidrio y microcristales.” Es bien difícil



creer que una roca del Jurásico, sometida a eventos orogénicos posteriores pueda conservar una mesóstasis no devitrificada. Por otra parte la cartografía geológica y las relaciones de campo indican que se trata de rocas volcánicas muy posteriores al Jurásico, mas precisamente del Cenozoico. Estas vulcanitas presentan características similares a las descritas por **Galvis & De la Espriella** (1999) en el Sureste de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el valle del río Cesar y parte de la Serranía de Perijá.

En la base de la secuencia de sedimentitas del Cretáceo se encuentra un basalto de color negro azulado (Anexo 2, Fotografía 2), compuesto principalmente por labradorita y clinopiroxeno. Hacia el tope de las coladas de este basalto se presentan algunas ocurrencias minerales de tipo exhalativo.

Hay exposiciones de ese basalto en la carretera que conduce de la población de Distracción a la Angostura a lo largo de la cañada del río Ranchería y al Sur de la vía de Cuestecita a Riohacha.

Acerca de las unidades estratigráficas del Cretáceo que sobreyacen a los basaltos citados, hay suficiente información bio-estratigráfica. En la base se presenta una espesa secuencia de calizas gris-azulas a negras, con intercalaciones menores de lutitas. Dichas calizas se encuentran expuestas en el cerro Cerrejón, en vecindades del caserío de Cuestecita y en un amplio sector al Sur del caserío de El Tabaco (Anexo 2, Fotografías 3 y 4), especialmente en la cuenca del arroyo La Cortadera, en la vía Distracción-Caracolí donde forman imponentes escarpes en el sector de Angostura (Anexo 2, Fotografía 5). Estas calizas originalmente recibieron el nombre de Formación Cogollo Miller (1962), posteriormente fueron divididas en dos formaciones denominadas formaciones Lagunitas y Aguas Blancas por **Cáceres, Camacho & Reyes** (1980).

Las dataciones sitúan las calizas en mención en el intervalo Aptiano-Albiano.

A las calizas en mención, les sobreyacen concordantemente calizas bituminosas finamente laminadas, alternando con lutitas negras, sobre las cuales reposan algunos niveles de chert, los cuales, según Cáceres, Camacho & Reyes, entre el Turoniano y el Coniaciano. Esta unidad conocida generalmente denominada Formación la Luna, se halla expuesta al Este de Cerrejón en las quebradas Los Mangos y Los Estados. (Anexo 2 Fotografía 6).

Sobre la formación descrita, reposa una secuencia de lutitas arenosas, con intercalaciones finamente laminadas de caliza y areniscas glauconíticas de grano fino, situadas por **Cáceres, Camacho & Reyes** (1980) entre el Santoniano

y el Campaniano, esta secuencia se conoce como Formación Molino.

A esta formación, le sobreyace la Formación Hatonuevo, compuesta de calcarenitas parduscas alternando con lutitas. Esta formación se depositó en la transición Cretáceo-Cenozoico

Sobre la Formación Hatonuevo, reposan coquinas con abundantes restos de ostreidos, observables al Norte del arroyo El Cedro, en vecindades del caserío de Los Remedios, esta unidad estratigráfica se conoce como Formación Manantial. (Anexo 2, Fotografía 7).

Sobre la Formación Manantial se encuentra la Formación Cerrejón, una espesa secuencia de sedimentitas, compuesta por arcillolitas y lodolitas carbonáceas, de color gris oscuro, con abundantes restos vegetales alternando con areniscas feldespáticas (Anexo 2, fotografía 8), friables de color gris oscuro, aspecto de sal y pimienta, intercaladas con limolitas de similar composición, hay además areniscas cuarzosas con un especial brillo chispeante, posiblemente originado en cristalitas de cuarzo autigénico, cabe anotar que estas areniscas se observan en todas las cuencas carboníferas del Oriente Andino en Colombia. Además se encuentran en la Formación Cerrejón areniscas calcáreas, en las cuales en el carbonato se halla en la matriz, son micáceas y presentan además de cuarzo, fragmentos de rocas ígneas, en esta unidad, también se observan intercalaciones de limolitas y lodolitas. La Formación Cerrejón es ampliamente conocida por las enormes reservas de carbón que contiene.

En cercanías del cerro Cerrejón se observan intercalaciones de brechas volcánicas en la Formación Cerrejón; **Álvarez & Gómez** (1984) atribuyeron la presencia de estas rocas efusivas a la fusión de rocas sedimentarias como consecuencia de la combustión de mantos de carbón, tesis no compartida por los autores del presente artículo.

Se observan intercalaciones de brechas volcánicas en las areniscas sal y pimienta características de la Formación Cerrejón en inmediaciones del caserío de Tamaquito, y en la cuenca de la quebrada El Peñón. Las brechas volcánicas también aparecen con profusión al oriente del cerro Cerrejón en riberas de los ríos Salado y Pesquería (Anexo 2, Fotografías 9 y 10).

En la parte cóncava de la herradura que forma el cerro Cerrejón, al Oriente de este, se encuentran pórfidos, algunos de los cuales presentan xenolitos de caliza (Anexo 2, fotografía 11) foto, en la zona de contacto con los pórfidos, las calizas se observan marmolizadas. En el curso del río

Salado se hallan lavas con texturas afanítica y porfirítica y dentro de la cuenca hidrográfica de dicho río, en Loma Carolito, se presenta un cono volcánico. En el valle del río Ranchería (Anexo 2, Fotografías 12 y 13) hay grandes depósitos de material piroclástico, este es especialmente conspicuo en la región alrededor de Fonseca y en la cuenca inferior del río Palomino.

Como unidades estratigráficas posteriores a las vulcanitas más recientes, solamente cabe mencionar algunos aluviones de poco espesor a lo largo de los ríos Ranchería, Pesquería y Palomino.

### Tectónica

El rasgo tectónico más importante en el área de Cerrejón, es la falla de Oca, de tipo direccional, rumbo E-W, la cual pone en contacto la placa tectónica donde se halla la Cuenca Cesar- Ranchería, con la placa del Caribe oriental, cuya evolución geológica y por tanto su litología son completamente diferentes. Basta anotar que al Norte de dicho fallamiento se presenta una plataforma de rocas precámbricas cubierta por sedimentitas marinas del Neógeno. En la falla de Oca, hay un truncamiento total de las estructuras de diéctriz NE-SW que caracterizan la zona del Cerrejón.

La tectónica del área de Cerrejón se caracteriza por presentar dos sistemas de fallas, NE-SW y NEE-SWW, hasta E-W; Ambos sistemas parecen ser de carácter transcurrente. La principal falla NE-SW, es la de Cerrejón, localizada al Este del cerro homónimo, se puede observar en la confluencia de los ríos Salado y Pesquería. Debido a la cubierta volcánica, en gran parte se oblitera, sin embargo persiste el lineamiento topográfico que continúa hacia el SW por la desembocadura del arroyo Orejero en el río Palomino y más al SW por la confluencia de los arroyos Surimena y Riecito, pasando por las localidades de El Conejo y El Molino. Hacia el Norte continúa hasta su truncamiento por la falla de Oca.

Al Norte, partiendo aproximadamente del paraje denominado Casa Loma, se observa una falla E-W antitéctica de la falla de Cerrejón. Al Norte del vértice que forman estas dos fallas, se observa una estructura que asemeja un cabeceo sinclinal, en la cual se presentan ampliamente expuestas las calizas del Cretáceo. Al Sur, alineando al arroyo Surimena, se presenta otra falla E-W, aparentemente antitéctica de la de Cerrejón.

Un aspecto estructural interesante es el pliegue que forman las calizas del Cretáceo en el cerro Cerrejón, una especie de herradura cuyo lado cóncavo se encuentra al Suroeste. Como se puede ver en la imagen de satélite, dicho pliegue es parte de una amplia estructura circular, cuyo

contorno se puede apreciar en toda la zona al SE del citado cerro. Se puede además notar que dentro de la geoforma circular, hay geoformas dómicas menores, lo cual se relaciona con la actividad ígnea. Partiendo de la estructura circular, **Álvarez y Gómez** (1984) definieron algunas fallas en un patrón radial a partir del cerro Cerrejón.

Al Sur del río Palomino, en el cerro Majagüita se observa una estructura dómica (ver imagen de satélite), correspondiente a otro edificio volcánico.

El levantamiento de la serranía de Perijá parece haber tenido lugar posteriormente al evento magmático, como una tectónica de bloques.

### Conclusiones

Hay varios aspectos a considerar en referencia al magmatismo en la región de Cerrejón. En primer lugar está su cronología relativa. Las intercalaciones de rocas efusivas en la Formación Cerrejón indican que el evento volcánico tuvo una iniciación contemporánea con la depositación de los carbones. Parece haberse presentado una paleo-topografía similar a la de algunas zonas de Indonesia, en la actualidad, donde hay conos volcánicos activos en medio de amplias zonas de manglares. La actividad volcánica parece haber continuado hasta el Neógeno, ya que se presentan extensos depósitos piroclásticos en superficie, en el valle del río Ranchería (Anexo 2, Fotografía 13).

Otro aspecto importante es la extensión del episodio magmático. Todo parece indicar que el magmatismo tuvo lugar a lo largo de la falla de Cerrejón. Al Suroeste, en el sector donde el río Palomino cruza dicho fallamiento se observan calizas marmolizadas por metamorfismo de contacto y al Sur de dicho río, el cerro Majagüita es otro foco volcánico con una litología similar (ver imagen de satélite), cuyas efusiones cubrieron de piroclastitas amplias zonas del valle del Ranchería entre Fonseca y Barrancas.

Continuando al Suroeste, siguiendo la falla de Cerrejón, se encuentran rocas volcánicas y subvolcánicas y ocurrencias de mineralizaciones hidrotermales en las localidades de Conejo y El Molino. La actividad ígnea ha formado a lo largo de la falla de Cerrejón, una serranía de poca altura, paralela a la de Perijá.

Hay otro aspecto interesante en el cerro Cerrejón, parece que la falla de Cerrejón haya tenido actividad luego del episodio volcánico, por lo cual la herradura del cerro propiamente dicho aparece desfasada respecto al círculo

principal de la caldera que se observa al Oriente y al cono resurgente de Loma Carolito.

Por último cabe mencionar la composición de las vulcanitas cenozoicas de la región del Cerrejón. Macroscópicamente se pueden observar pórfidos (Anexo 2, ver fotografía 14) de color violáceo, gris azulado o ligeramente rosados, con fenocristales de cuarzo, en una matriz que en algunos sitios se presenta afanítica o en otros micro-cristalina. Donde se presenta cristalina se alcanzan a identificar feldespatos de potasio y plagioclasas, lo cual permite creer en una composición riodacítica. En general, no se pueden identificar minerales máficos aunque en algunas muestras parece haber piroxeno.

### Referencias citadas

- Álvarez, R. & Gómez, C.** 1984. Para-lavas Basálticas y Metamorfitas Generadas por Combustión Espontánea de Mantos de Carbón, Formación Cerrejón, Colombia. Geología Norandina No. 10. Bogotá.
- Bowen, J. M.** 1972. Estratigrafía del Pre-cretáceo en la parte Norte de la Serranía de Perijá. Mem. IV Congreso Geológico Venezolano. Caracas.
- Cáceres, H., Camacho, R. & Reyes, J.** 1980. Guide Book to the Geology of the Ranchería Basin. Bol. Soc. Geol. Geof. Pet. Bogotá.
- Forero, A.** 1972. Estratigrafía del Pre-cretáceo en el Flanco Occidental de la Serranía de Perijá. Geología Colombiana No. 7 Bogotá.
- Hedberg, H. D. & Sass, L. C.** 1937. Sinopsis de las Formaciones Geológicas de la Parte Occidental de la Cuenca de Maracaibo, Venezuela. Bol. Geol. y Min. Vol. 1 No. 2-4. Caracas.
- Galvis, J. & De la Espriella, R.** 1999. Vulcanitas Cenozoicas en el Borde Suroriental de la Sierra Nevada de Santa Marta y en la Serranía de Perijá. Rev. Acad. Col. De Cienc. Exac. Fís. y Nat. Vol. 23, No. 87. Bogotá.
- Liddle, R. A., Harris, C. D. & Wells, J. W.** 1965. The Río Cachirí Section in the Sierra de Perijá, Venezuela. Bull. Am. Paleontologist. Vol. 27, No. 108.
- Miller, J. B.** 1962. Tectonic Trends in Sierra de Perijá and Adjacent Parts in Venezuela and Colombia. Bull. Am. Assoc. of Pet. Geol. Vol. 46, No. 9.
- Trumpy, D.** 1943. Pre-cretaceous of Colombia. Geol. Soc. Amer. Bull. Vol. 54, No. 9.
- Radelli, L.** 1962. Acerca de la Geología de la Sierra de Perijá entre Codazzi y Villanueva. Geología Colombiana No. 1. Bogotá.
- Ujueta, G. & Llinás, R.** 1992. Reconocimiento Geológico de la parte mas septentrional de la Serranía de Perijá. Geología Colombiana No. 17. Bogotá.

Recibido: julio 11 de 2007

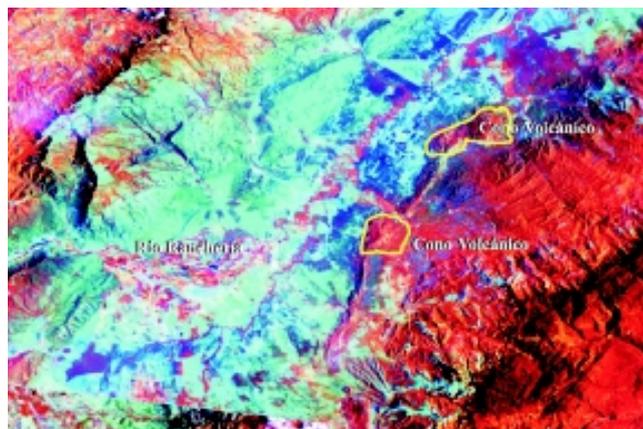
Aceptado para su publicación: marzo 6 de 2008

### Anexo 1

#### Imágenes de satélite de la región del cerro Cerrejón - Serranía de Perijá. Departamento de la Guajira, Colombia



**Imagen 1.** Cono volcánico conformado por el cerro Cerrejón, en la Serranía de Perijá, al Oriente del Complejo Carbonífero de El Cerrejón. Departamento de La Guajira.



**Imagen 2.** Conos volcánicos conformados por el cerro Cerrejón al Norte y en la parte alta del Arroyo Palomino al Sur. Borde Occidental de la Serranía de Perijá, al Oriente del Complejo Carbonífero de El Cerrejón. Departamento de La Guajira.

## ANEXO 2

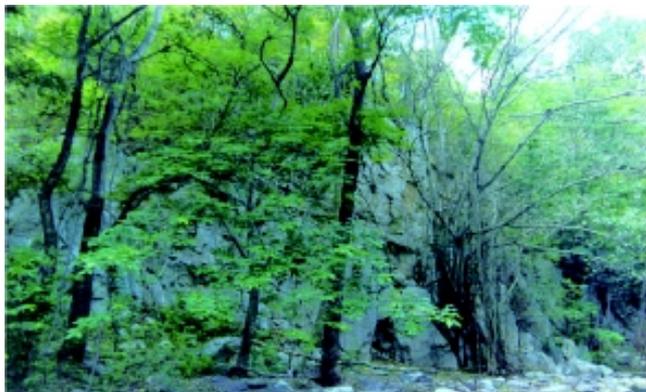
**Registro fotográfico de la región del cerro Cerrejón - Serranía de Perijá.  
Departamento de la Guajira, Colombia**



**Foto 1.** Al fondo, panorámica del cerro Cerrejón situado en el borde Occidental de la Serranía de Perijá. Departamento de la Guajira. Colombia.



**Foto 2.** Basalto de color negro azulado compuesto principalmente por labradorita y clinopiroxeno. Constituye la base de la secuencia de sedimentitas calcáreas Cretáceas. Carretera que conduce de Distracción a Caracolí.



**Foto 3.** Calizas de la Formación Cogollo en la Quebrada La Cortadera, al Nor-Oriente del cerro Cerrejón.



**Foto 4.** Calizas de la Formación Cogollo con cavidades rellenas con calcedonia negra en la Quebrada La Cortadera, al Nor-Oriente del cerro Cerrejón.



**Foto 5.** Calizas de la Formación Cogollo depositada sobre rocas basálticas, en la carretera que conduce de Fonseca-Cotoprix, al Occidente de la cuenca carbonífera de El Cerrejón.



**Foto 6.** Rocas calizas de la Formación La Luna en la Quebrada Los Mangos. Parte Oriental del cerro Cerrejón.

## Continuación Anexo 2

Registro fotográfico de la región del cerro Cerrejón - Serranía de Perijá.  
Departamento de la Guajira, Colombia

**Foto 7.** Coquina de la Formación Manantial al Oriente del caserío Los Remedios.



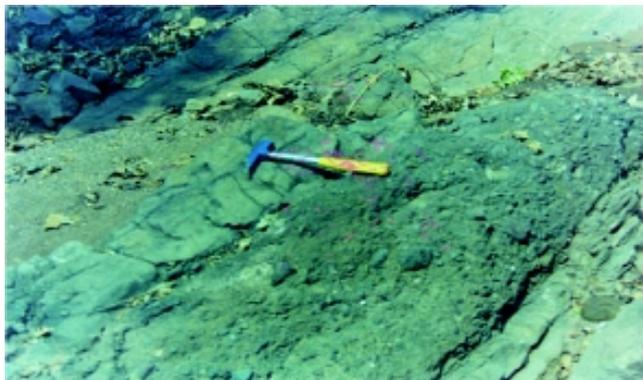
**Foto 10.** Brecha volcánica cerca de la finca Sol y Sombra en vecindades del caserío Tabaquito.



**Foto 8.** Arenisca verdosa de grano fino perteneciente a la Formación Cerrejón. Caserío de Tabaquito.



**Foto 11.** Cantos y gravas de rocas porfíricas con un xenolito de caliza, al Nor-Oriente del Arroyo Cerrejón.



**Foto 9.** Brecha volcánica interstratificada con areniscas, en inmediaciones del caserío de Tabaquito.



**Foto 12.** Abundantes rodados de rocas volcánicas de color púrpura a lo largo del cauce del Arroyo Cerrejón.

**Continuación Anexo 2****Registro fotográfico de la región del cerro Cerrejón - Serranía de Perijá.  
Departamento de la Guajira, Colombia**

**Foto 13.** Depósito de ceniza volcánica cubierto por material piroclástico en la margen izquierda del Arroyo Cerrejón, al Nor-Occidente del cerro Cerrejón.



**Foto 14.** Pórfido, en el bloque de la izquierda pueden verse los fenocristales de cuarzo. En la vertiente oriental del cerro Cerrejón.

# INSOLATION AT THE EARTH'S SURFACE

by

Joaquín Pelkowski<sup>1</sup>

## Abstract

**Pelkowski, J.:** Insolation at the Earth's Surface. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(122): 25-35, 2008. ISSN 0370-3908.

The (variable) transparency of our atmosphere regulates the amount of solar energy reaching the ground. Also known as clearness index or transmissivity, it has been related linearly to relative sunshine hours ever since the seminal work of Ångström, whose regression model was later modified and generalized, to become a classic tool in the statistical assessment of the global radiation at the surface of the Earth. In this paper we submit a physico-meteorological rationale for the polynomial regression between clearness index and relative sunshine duration.

**Key words:** Ångström-PreScott regression, solar surface irradiance, radiative transfer.

## Resumen

La transparencia (variable) de nuestra atmósfera regula la cantidad de energía solar recibida al nivel del mar. Conocida también como índice de claridad o transmisividad, se ha relacionado linealmente con la heliofanía desde el trabajo influyente de Ångström, cuyo modelo de regresión fue modificado y generalizado más tarde, convirtiéndose en una herramienta clásica para la estimación estadística de la irradiación solar en superficie. En el presente artículo proponemos una base físico-meteorológica para la regresión polinomial entre el índice de claridad y la heliofanía relativa.

**Palabras clave:** Insolación en superficie, regresión de Ångström-PreScott, transferencia radiactiva.

---

<sup>1</sup> Castillo de Capellomonte, Alemania. Correo electrónico: jo-ellen.pelkowski@t-online.de

## 1. Introduction

A vast literature seems to have sprung from a single source, an article published in 1924 by **Anders Ångström**, in which a linear relation between a relative short-wave transparency of the atmosphere and a relative sunshine duration is put forward. It was later modified by **Prescott** (1940), who replaced *relative* with *absolute* transparency.

Sunshine recordings are more widely available than irradiation measurements. For that reason, attempts have been and still are made to find, by regressional methods, the coefficients of what is often called the Ångström-Prescott formula.

For many practical purposes, the linear regression has proved valuable. Recently, however, a quadratic dependence on relative sunshine duration has been shown to reproduce measured values better, in a statistical sense.

Alternatively, the coefficients in the linear relation have been taken to be themselves functions of the regressor variable, giving thereby rise to such a quadratic dependency of transparency (or clearness index) on relative (or fractional) sunshine duration (**Akinoglu** 2008). Even a third-order polynomial regression between the two quantities has been used for data quality control purposes (**IDEAM & UPME** 2005).

The urge for physical underpinning of the regression coefficients has been recurrent, and some of the most recent attempts, of an *ad hoc* nature, towards that end have been surveyed by **Akinoglu** (2008). On the other hand, the theory of radiative transfer through atmospheres does afford a physical foundation for the calculation of atmospheric transparency.

Yet it is too elaborate to be of practical use, particularly when only limited measurements are available; little wonder, then, that there is still much room for the kind of simple statistical modeling that has been carried out in the spirit of Ångström's linear regression, a telling example being the new book edited by **Badescu** (2008).

Convinced of the assets of both approaches, a rationale for systematically deriving regression formulae of Ångström-Prescott-type is propounded on the basis of a simple two-stream model of radiative transfer. But first we need to look into the original formulae more closely.

## 2. Ångström's formula and its generalizations

As already asserted, **Ångström** (1924) proposed a linear relation between a relative transparency of the atmosphere for solar radiation and the relative sunshine duration, to wit:

$$\overline{T}_A = a_A + b_A \overline{\eta} \quad (1)$$

where

$$\overline{T}_A \equiv \frac{\overline{Q^\downarrow}(\tau_b)}{Q_0^\downarrow(\tau_b)} \quad (2)$$

defines a certain (mean) transparency and

$$\overline{\eta} \equiv \frac{\overline{h}}{H} \quad (3)$$

is often referred to as the (average) relative (or fractional) sunshine duration.  $\overline{Q^\downarrow}(\tau_b)$  we define here as the mean flux density (irradiance, insolation) at the (horizontal) surface of the Earth; likewise,  $Q_0^\downarrow(\tau_b)$  is the mean flux density, but for a sunny, cloudless day.  $\tau_b$  is the optical depth of the whole atmosphere, a measure of its opacity with respect to solar radiation;  $\overline{h}$  is represents a convenient mean of  $h$ , itself being the number of sunshine hours during a whole day, while  $H$  stands for the maximum possible amount of sunshine at a certain geographical place and time of the year. It can be calculated from astronomical considerations of the insolation distribution on the top of the Earth's atmosphere.

The bars appearing in these equations remind us that Ångström rightly saw his formula to be applicable only to climatological values of transparency and sunshine, not to instantaneous ones. The period over which has to be averaged is a matter of choice; it could refer to monthly values, by averaging the daily recordings of solar radiation and sunshine; or it could represent seasonal averages, even yearly or decadal ones. Furthermore, all quantities involved are, in principle, spectral ones, and therefore they depend on the wavelength of the solar radiation reaching sea level. We shall omit both the bars and any reference to the wavelength dependency, on the understanding that the quantities involved in this article are monochromatic averages, unless otherwise stated. As we will not be dealing with instantaneous irradiation, the model to be laid down disregards from the outset the actual elevation of the sun's disk as it varies with the hour of a day, and thus delivers at best daily averages of insolation.

Formula (1) was modified by **Prescott** (1940) to read

$$\mathcal{T} \equiv \frac{Q^\downarrow(\tau_b)}{Q^\downarrow(0)} = a + b\eta, \quad (4)$$

who introduced absolute transparency,  $Q^\downarrow(0)$  now standing for the solar flux density at the top of the atmosphere (where optical depth vanishes). Also known as insolation, it is expressed by the formula

$$Q^\downarrow(0) = \left(\frac{D_0}{D}\right)^2 Q_0 \cos \theta_0, \quad (5)$$

in which  $Q_0$  is the (monochromatic) extraterrestrial normal solar flux density (known as the solar constant),  $\theta_0$  being the sun's (disk) zenith angle, measured with respect to the local normal.  $D$  denotes the actual distance of the Earth from the Sun,  $D_0$  being an average distance (the astronomical unit). The daily average of this expression follows upon integrating (5) over a day's period, with the understanding that  $Q^\downarrow(0)$  vanishes during the night ( $\theta_0 > \pi/2$ ):

$$\left(\frac{D_0}{D}\right)^2 \frac{Q_0}{\pi} (\Lambda_0 \sin \Phi \sin \delta + \sin \Lambda_0 \cos \Phi \cos \delta).$$

Here,  $\pm \Lambda_0$  is the hour angle at sunset (+) or sunrise (−) for latitude  $\Phi$  and declination angle  $\delta$ . The maximum possible sunshine hours at a certain location,  $H$ , used in defining  $\eta$ , and the hour angle  $\Lambda_0$  (in degrees) are related by  $H = 2\Lambda_0/15$ . All these definitions are well known from studies of insolation distribution on planets and need not be discussed here any further.

The Ångström-Prescott and the original Ångström formulas may readily be shown to be related as follows:

$$\mathcal{T}_A(\eta) = \frac{\mathcal{T}(\eta)}{\mathcal{T}(1)} \quad (6)$$

and hence  $\mathcal{T}_A(1) = a_A + b_A = 1$ . We expect measurements of  $\mathcal{T}_A(\eta)$  and  $\mathcal{T}(\eta)$  to be perfectly correlated. We therefore are not surprised to learn that **Ianetz & Kudish** (2008), who think  $\mathcal{T}_A(\eta)$  to be a “better indicator of the degree of cloudiness than the oft used  $\mathcal{T}(\eta)$ ”, find them to be highly correlated. They conclude from a statistical analysis of measurements at Beer Sheva that the regression coefficients for monthly averages of both transparencies explain almost 100% of the data variance.

Many values for the Ångström-Prescott coefficients  $a$  and  $b$  have been published for different places; it is not the purpose of this article to review them. For the sake

of illustration, I quote only a pair purported to be representative of the whole of France:  $a = 0.2$  and  $b = 0.55$  (**Guyot** 1998). But we must keep in mind that the values do vary from place to place, depending also on the averaging period. According to **Akinoglu** (2008), they range between the following limits:  $0.06 \leq a \leq 0.46$  and  $0.19 \leq b \leq 0.87$ .

We pointed out above that efforts to generalize the formula of Ångström or Ångström-Prescott are not uncommon. It seems that a quadratic relationship between  $\mathcal{T}$  and  $\eta$  produces better results when compared with some data (**Akinoglu** 2008), and even higher order polynomials have been proposed (**Şahin & Şen** 2008). A third-order polynomial was deemed necessary by the authors of the solar radiation atlas of Colombia (**IDEAM & UPME** 2005), from where we quote, for later reference, the following numerical example (correlation coefficient of 0.56)<sup>2</sup>:

$$\mathcal{T} = 0.343 + 0.244\eta + 0.113\eta^2 - 0.026\eta^3. \quad (7)$$

Whatever the specific reasons for such generalizations, it does seem clear that expanding Ångström's original regression model to allow for a polynomial regression between  $\mathcal{T}$  and  $\eta$  is a natural step. If the regression coefficients could be shown to derive from a physical model of the relation between insolation and sunshine, our resolve to carry out all the statistical inferences necessary to validate the regression models would thereby be strengthened.

With this question of the physical origin of statistical coefficients in mind it is that we put forward a physico-meteorological rationale for the polynomial regression between the transparency of the atmosphere and the relative sunshine duration.

### 3. A model atmosphere

A model atmosphere simple enough will allow us to achieve our aim set forth in the last paragraph. Two-stream models have been found to be parsimonious approximations to the radiative transfer of electromagnetic energy through a plane-parallel atmosphere. In their broadband or semi-gray versions, they enable one to calculate the transmissivity (transparency) of the model atmosphere, either with respect to solar or thermal radiation. I shall not discuss two-stream models here, of which differing versions can be found in many textbooks.

<sup>2</sup>Unfortunately, the atlas is silent as to locality and period for which the values apply, so this equation should be taken as a mere numerical illustration. I regret not being able to comply with the request of a reviewer, who wished to know the meteorological circumstances surrounding the regression, so as to bear out our interpretation, in Sec.3.2.1, of the negative coefficient.

While I shall be using my own version (Pelkowski 2007), any other model of the same kind may be laid down. For most details, however, the reader may also be referred to the textbook of Petty (2006), or to the lucid and briefer exposition by Bohren (1987).

The transparency of a plane-parallel atmosphere—a good model for the vertical energy fluxes in the real atmosphere—can be calculated starting from the equation of (monochromatic) radiative transfer, which we write as:

$$\mu \frac{\partial I(\tau, \mu)}{\partial \tau} = I - \frac{a}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') I(\tau, \mu') d\mu'. \quad (8)$$

The symbols have the usual meanings<sup>3</sup>:

$I$ : radiance (intensity) of a light ray inclined with respect to the local normal by a zenith angle  $\theta = \cos^{-1} \mu$

$\tau$ : optical depth into the atmosphere at altitude  $z$ ,

$$\tau(z) = \int_z^{H_t} k \rho dz', \quad (9)$$

in which  $k$  is the (specific or mass) extinction coefficient,  $\rho$  the density of the optically active matter, and  $H_t$  the height of the top of the atmosphere

$P$ : phase function, describing the angular distribution of radiance at a point where the incident radiation with zenith angle  $\theta' = \cos^{-1} \mu'$  is being scattered into the ray with zenith angle  $\cos^{-1} \mu$ .

$a$ : scattering albedo (the ratio of scattering coefficient to total extinction coefficient).

Note that in general we should include a thermal source of photons emitted by matter at the local temperature, a source that however barely contributes to the short-wave energy fluxes. It can be safely neglected in our context.

By next introducing the downward and upward short-wave energy flux densities at any depth  $\tau$ ,  $Q^\downarrow(\tau)$  and  $Q^\uparrow(\tau)$ , respectively, defined as

$$Q^\downarrow(\tau) = -2\pi \int_{-1}^0 I(\tau, \mu) \mu d\mu > 0$$

and

$$Q^\uparrow(\tau) = 2\pi \int_0^{+1} I(\tau, \mu) \mu d\mu > 0,$$

we may set up equations apiece, starting from the radiative transfer equation (8) (Petty 2006, Pelkowski

2007):

$$\mu^+ \frac{dQ^\downarrow(\tau)}{d\tau} = -(1 - af)Q^\downarrow(\tau) + a(1 - f)Q^\uparrow(\tau) \quad (10)$$

and

$$\mu^+ \frac{dQ^\uparrow(\tau)}{d\tau} = (1 - af)Q^\uparrow(\tau) - a(1 - f)Q^\downarrow(\tau). \quad (11)$$

To derive these equations, some simplifying assumptions were made, an important one being the choice of the phase function.  $\mu^+ > 0$  is independent of  $\tau$ , but it may vary with wavelength and total optical depth  $\tau_b$ , defined by Eq. (9) as  $\tau_b = \tau(0)$ , as shown in Pelkowski (2007). Note that  $\mu^+ \in (0, 1]$ . In Petty's (2006) two-stream equations,  $\mu^+ = 0.5$ , while Bohren's (1987) two-stream version corresponds to  $\mu^+ = 1$ . In our model, a singular phase function was chosen so that a fraction  $f$  of the energy is effectively scattered into the hemisphere (with equatorial plane parallel to the atmospheric layers) into which the energy flows, the complementary fraction  $1 - f$  being back-scattered. Fraction  $f$  is shown in my previous account to be related to the asymmetry factor  $g$  by  $f = (1 + g)/2$ , while Petty (2006) assumes it as plausible. The asymmetry factor is a widely used characteristic of the asymmetry in the distribution of scattered radiance, reflecting, to a certain extent, the size, shape and nature of the scattering particles. Plenty of values can be found in the relevant literature.

Eqs. (10) and (11) are ordinary differential equations for the flux densities of solar radiation that cross the atmosphere either downwards or upwards. The value of the downwelling flux density at the surface (where  $\tau = \tau_b$ ) is known as the "global" irradiance. This surface insolation  $Q^\downarrow(\tau_b)$  comprises both the direct and the diffuse irradiance, which may be kept separate, as is commonly done in studies of its measurement and calculation:

$$Q^\downarrow(\tau_b) = Q^\downarrow_\odot(\tau_b) + Q^\downarrow_*(\tau_b). \quad (12)$$

However, we shall not need this distinction beforehand, since our model, being applicable at best to daily averages, will not include the daily variation of the hour angle. Only an effective cosine  $\mu^+$  is taken into account, which may be interpreted as an average of the cosine of the sun's zenith angle.

As a side remark, and for later reference, I point out that when no diffuse fluxes are separately measured, only "global" ones, many an investigator has tried to infer the former from the latter. For example, Boland

<sup>3</sup>Almost all quantities are spectral ones but we need not remind ourselves every time of this fact.

& Ridley (2008) show that by defining the diffuse fraction

$$\mathcal{D} = \frac{Q_{\star}^{\downarrow}(\tau_b)}{Q^{\downarrow}(\tau_b)}, \quad (13)$$

which in our notation we write as

$$\mathcal{D}(T) = 1 - \frac{\mathcal{T}_{\odot}}{T}, \quad (14)$$

a logistic function can be fitted to the data between  $\mathcal{D}$  and  $T$ .  $\mathcal{D}$  tends to be small when the transmissivity is dominated by the direct component  $\mathcal{T}_{\odot} = Q_{\odot}^{\downarrow}(\tau_b)/Q^{\downarrow}(0)$ , but if the direct component is absent (as in overcast skies), then  $\mathcal{D} = 1$ .

The transparency of the atmosphere,  $T = Q^{\downarrow}(\tau_b)/Q^{\downarrow}(0)$ , can now be determined for an optically uniform model atmosphere (for which  $a$  and  $g$  are independent of position within the layer) from the solution to Eq. (10) under appropriate boundary conditions (Petty 2006), including the solar energy reflected isotropically at the surface, whenever its albedo  $r_s$  does not vanish. The following expression for the transparency is thus arrived at (Pelkowski 2007):

$$T = \frac{1 - r_{\infty}^2}{e^{\gamma\tau_b^*} - r_{\infty}^2 e^{-\gamma\tau_b^*} - r_s r_{\infty} (e^{\gamma\tau_b^*} - e^{-\gamma\tau_b^*})}, \quad (15)$$

with abbreviations defined as:  $\tau_b^* = \tau_b/\mu^{\dagger}$ ,

$$\gamma \equiv \sqrt{(1-a)(1-ag)} \quad (16)$$

and

$$r_{\infty} = \frac{\sqrt{1-ag} - \sqrt{1-a}}{\sqrt{1-ag} + \sqrt{1-a}}. \quad (17)$$

$r_{\infty}$  is the (intrinsic) reflectivity of a semi-infinite scattering layer (see Eq. (20) below, for  $\tau_b^* \rightarrow \infty$ ).

The transparency may be rewritten more compactly as

$$T = \frac{t}{1 - r_s r}, \quad (18)$$

by means of the intrinsic transmissivity

$$t = \frac{1 - r_{\infty}^2}{e^{\gamma\tau_b^*} - r_{\infty}^2 e^{-\gamma\tau_b^*}} \quad (19)$$

and the intrinsic reflectivity

$$r = r_{\infty} \frac{1 - e^{-2\gamma\tau_b^*}}{1 - r_{\infty}^2 e^{-2\gamma\tau_b^*}} \quad (20)$$

of the optically uniform atmosphere.

In establishing these quantities, the atmosphere was assumed to be optically uniform, so that the solution of the flux equations (10) and (11) could be found by standard methods. As we wish to take into account

the observed vertical variations of optical parameters of the atmosphere, we refine the model by dividing the atmosphere into a minimum number of optically uniform layers. If we agree that cloudiness should be included in a model purporting to relate transparency and daily sunshine duration, we perceive at once that a minimum of three layers is required (Pelkowski 2007): a cloud layer with variable cloudiness, a cloudless upper layer and a cloudless lower layer. Every layer is supposed to be optically uniform, and we shall distinguish corresponding quantities in each layer with different subscripts:  $c$  refers to cloud properties in the cloud's layer (itself distinguished by the subscript  $n$ ),  $\Delta$  refers to the atmosphere free of clouds within that cloud layer (in which the clouds have optical thickness  $\tau_{cb}$ , the interstices being less deep,  $\tau_{\Delta b} = \tau_2 - \tau_1$ );  $u$  shall refer to the upper layer (of total optical depth  $\tau_{ub} = \tau_1$ ); finally,  $l$  is reserved for the lower atmospheric layer (of optical thickness  $\tau_{lb} = \tau_b - \tau_2$ ). All three layers will have a transmissivity and reflectivity described by the above formulae, but with surface albedo being replaced by appropriate albedos, corresponding to the layers underneath (and to which the surface albedo also contributes). Of course, in the middle layer (hosting the clouds) we will have to arrange for the different transmissivities and reflectivities of the clouds and interstices, and a careful accounting of all the solar fluxes bouncing back and forth between the surface and the cloud layer does indeed lead to simple weighting with cloud amount  $n$ :

$$\mathcal{T}_n = \frac{t_n}{1 - A_l r_n} \quad (21)$$

$$t_n = n t_c + (1 - n) t_{\Delta} \quad (22)$$

$$r_n = n r_c + (1 - n) r_{\Delta}. \quad (23)$$

In Eq. (21), we replaced  $r_s$  by the albedo  $A_l$  of the system made up by the surface and the lower atmosphere, which would be the albedo of the Earth if the middle and upper layers were not present:

$$A_l = r_l + \frac{r_s t_l^2}{1 - r_s r_l}. \quad (24)$$

This expression may be derived in much the same way as that for the transparency of an optically uniform layer, Eq.(18), by first solving the flux equation for the upward solar radiation,  $Q^{\uparrow}(\tau)$ , Eq. (11), and then appealing to the definition of albedo:

$$A_l = \frac{Q^{\uparrow}(\tau_2)}{Q^{\downarrow}(\tau_2)}.$$

(For a rigorous approach, see Chevallier et al. 2007, or Kokhanovsky 2006). The albedo of the upper layer

$A_u$  coincides with the albedo  $\mathcal{A}$  of the Earth and is given by the well-known ratio:

$$\mathcal{A} = A_u = \frac{Q^\uparrow(0)}{Q^\downarrow(0)} = r_u + \frac{A_n t_u^2}{1 - A_n r_u}, \quad (25)$$

( $\mathcal{A} = 0.3$  being the presently accepted climatological value); likewise,

$$A_n = \frac{Q^\uparrow(\tau_1)}{Q^\downarrow(\tau_1)} = r_n + \frac{A_l t_n^2}{1 - A_l r_n} \quad (26)$$

is the albedo of the earth/atmosphere below the depth  $\tau_1$  (the top boundary of the middle layer).

We need all these expressions because they appear in our model atmosphere's transparency, which is found by multiplying the transmissivities of the three layers (Pelkowski 2007):

$$\mathcal{T} = \mathcal{T}_u \mathcal{T}_n \mathcal{T}_l = \frac{t_u t_n t_l}{(1 - A_n r_u)(1 - A_l r_n)(1 - r_s r_l)}. \quad (27)$$

This is the key expression for the following development. For a discussion of a similar procedure, but from a rather advanced level, the patient reader may wish to consult Kokhanovsky (2006).

**3.1. Transparency of the tri-layered model atmosphere.** The transparency (27) may be rewritten as follows:

$$\mathcal{T} = \frac{t}{1 - \varrho} \quad (28)$$

with  $t = t_u t_n t_l$  and

$$\varrho = (1 - r_s r_l)[r_n(r_u + A_l) - r_u A_l(r_n^2 - t_n^2)] + r_s r_l. \quad (29)$$

If for a moment we assume that the surface albedo vanishes, together with the optical depths of the middle layer ( $\tau_{cb} = \tau_{\Delta b} = 0$ , so that  $\tau_1 = \tau_2$ ), this expression reduces to  $\varrho = r_u r_l$  and the transmissivity of a two-layer atmosphere is seen to be

$$\mathcal{T} = \frac{t_u t_l}{1 - r_u r_l}, \quad (30)$$

a result that may be found in the literature (Petty 2006, Kokhanovsky 2006).

Returning to the general expression (28), we remark that since  $\varrho < 1$ , we may write the transparency as a power series

$$\mathcal{T} = t \sum_{k=0}^{\infty} \varrho^k = t(1 + \varrho + \varrho^2 + \dots). \quad (31)$$

If it were generally true that  $\varrho \ll 1$ , we could approximate the transparency by the simpler expression:

$$\mathcal{T} \approx t(1 + \varrho). \quad (32)$$

Before proceeding any further, we ask how to relate the cloud fraction  $n$  and the fraction of sunshine duration, which we have denoted by  $\eta$ . Can we express the cloudiness as a function of  $\eta$ ,  $n = f(\eta)$ ? Certainly a relation between them must exist, though it may not be straightforward to find the right one. If the sun shone for a whole day, i.e., if  $\eta = 1$ , the day's average of cloudiness may be reasonably thought of as being nil:  $f(1) = 0$ ; vice versa, if no sunshine during the whole day is recorded ( $\eta = 0$ ), we may take that to be due to day-long overcast conditions:  $f(0) = 1$ . These two extreme values may be connected in a linear or nonlinear way, but we might certainly wish to begin with the simpler linear relation  $n = 1 - \eta$ , a relation that seemingly has been found to be useful in the literature (cf., e.g., Robinson 1966, and Kondratyev 1969). Of course, a more general relationship could be envisaged, particularly when cloudiness (as when mountains are capped), not affecting sunshine duration at a site, need somehow to be taken into account. Notwithstanding such a possibility, we shall abide by the linear relation between an average cloudiness and the fractional sunshine duration.

With this relation for  $n$ , it is now easy to express the transparency  $\mathcal{T}$  of the atmosphere as a function of sunshine duration  $\eta$ . The approximate expression (32), in which both factors depend on  $\eta$ , will suffice for our purposes. By carrying out the multiplication of the two factors, we may arrange the result to produce a third-order polynomial in  $\eta$ :

$$\mathcal{T}(\eta) = a_0 + a_1 \eta + a_2 \eta^2 + a_3 \eta^3 \quad (33)$$

wherein the coefficients are derived functions of reflectivities, albedos and transmissivities, given by the following expressions:

$$a_0 = a(1 + r_s r_l + \tilde{\gamma}_0) \quad (34)$$

$$a_1 = a\tilde{\gamma}_1 + b(1 + r_s r_l + \tilde{\gamma}_0) \quad (35)$$

$$a_2 = b\tilde{\gamma}_1 - a\tilde{\gamma}_2 \quad (36)$$

$$a_3 = -b\tilde{\gamma}_2 \quad (37)$$

Here we have introduced the following abbreviations:

$$a = t_u t_c t_l \quad (38)$$

$$b = t_u(t_\Delta - t_c)t_l \quad (39)$$

$$\gamma_0 = r_c(r_u + A_l) - r_u A_l(r_c^2 - t_c^2)$$

$$\gamma_1 = (r_\Delta - r_c)(r_u + A_l) - 2r_u A_l[r_c(r_\Delta - r_c) - t_c(t_\Delta - t_c)]$$

$$\gamma_2 = r_u A_l[(r_\Delta - r_c)^2 - (t_\Delta - t_c)^2]$$

$$\tilde{\gamma}_i = (1 - r_s r_l)\gamma_i \quad i = 0, 1, 2$$

Of course, if  $\rho$  is not small enough, instead of (33) we would get from (31) a polynomial of a higher degree. Indeed, (31) shows that the transparency is a polynomial of infinite degree in  $\eta$ , but we could still get a finite polynomial by lumping together the contributions of certain higher orders in  $\rho$  into a stochastic process, such that

$$\mathcal{T}(\eta) = \sum_{i=0}^N a_i \eta^i + \varepsilon.$$

It is clear that the coefficients  $a_i$  are in practice random variables, because the meteorological quantities determining them fluctuate more or less randomly. Henceforth we shall restrict our further development to  $N = 3$  and shall only consider particular cases of what may be called the “deterministic” transparency (i.e. with  $\varepsilon = 0$ ).

**3.2. Conditional transparencies of the tri-layered atmosphere.** By examining different special cases, we may simplify the interpretation of the coefficients in Eq. (33). The present section is devoted to some restrictions that lead to simpler forms of those coefficients.

**3.2.1. Non-scattering interstices between clouds.** This case will allow us to infer something about the coefficient  $a_3$ , given by (37). When the air in the interstices between the clouds of the middle layer does not scatter solar radiation,  $a_\Delta = 0$  and hence  $r_\Delta = 0$ . It is commonly assumed that clouds are almost conservative scattering media; we may take them to be perfectly so, with the implication that their scattering albedo is unity ( $a_c = 1$ ) and  $r_c + t_c = 1$ . Our middle layer thus consists of conservative clouds (a good assumption about real clouds) and interstices between them not scattering at all (not an appropriate assumption about real air but one that is not too critical here). Then (37) may, after a few transformations, be written as  $a_3 = -t_u(t_\Delta - t_c)t_l(1 - r_s r_l)r_u A_l(1 - t_\Delta)(t_\Delta + 2r_c - 1)$ . With typical values for the quantities involved, it is clear that  $a_3 < 0$ . If the interstices are even totally transparent, i.e.  $t_\Delta = 1$ , then  $a_3 = 0$ . In normal conditions  $t_\Delta$  will not be much less than unity, and so  $a_3$  can be expected to have a small magnitude. Eq. (7) reflects these inferences ( $a_3 = -0.026$ ).

**3.2.2. Non-scattering upper layer.** In this case, the scattering albedo of the upper atmosphere vanishes ( $a_u = 0$ ) and therefore  $r_u = 0$ ,  $\gamma_0 = r_c A_l$ ,  $\gamma_1 = (r_\Delta - r_c)A_l$ ,

$\gamma_2 = 0$  and hence  $a_3 = 0$ . The transparency then reads:

$$\mathcal{T}(\eta) = a_0 + a_1 \eta + a_2 \eta^2, \quad (40)$$

with accordingly modified coefficients (34), (35), and (36).

**3.2.3. Non-scattering upper and lower layers.** A similar quadratic equation is obtained if both the upper and lower layers do not scatter solar radiation ( $a_u = a_l = 0$ , implying  $r_u = r_l = 0$ ). Then, from Eqs. (24) and (29)  $\rho = r_n r_s t_l^2$ ; if the atmosphere consisted of only the middle layer, i.e. the optical depths of the upper and lower layers were nil or negligible, then by Eq. (19)  $t_l = 1$  and the original expression for the transparency (27) would read  $\mathcal{T} = t_n / (1 - r_s r_n)$ , which can be further simplified if we consider only clear skies ( $n = 0$ ):

$$\mathcal{T} = \frac{t_\Delta}{1 - r_s r_\Delta}.$$

Such a global irradiance under cloudless skies is considered by Kambezidis & Psiloglou (2008), who call  $r_\Delta$  the albedo of the cloudless sky after introducing, however, the denominator in an *ad hoc* manner: “...the effect of multiple ground-atmosphere reflections can be accounted for, scaling  $[Q^\downarrow(\tau_b)]$  by the adequate factor  $(1 - r_s r_\Delta)^{-1}$ ” (Kambezidis & Psiloglou 2008).

**3.2.4. Black surface.** In this case, the surface albedo is zero:  $r_s = 0$ . Consequently,  $\tilde{\gamma}_i = \gamma_i$ , and by (24)  $A_l = r_l$ . The polynomial retains its third-order degree. But if we add the further assumption that the upper and lower layers do not scatter solar radiation (i.e. have vanishing scattering albedos), then  $\tilde{\gamma}_i = A_l = 0$  and we get for the transparency the simple linear relationship

$$\mathcal{T}(\eta) = a + b\eta \quad (41)$$

in which the “Ångström-PreScott coefficients” become

$$a_0 = a = t_u t_c t_l \quad (42)$$

$$a_1 = b = t_u(t_\Delta - t_c)t_l. \quad (43)$$

It goes without saying that a layer that does not scatter solar energy can only transmit it as direct, not diffuse, radiation. Therefore

$$t_x = t_x^\odot = e^{-\tau_{xb}/\mu_x^+}, \quad x \in \{u, l\} \quad (44)$$

by Eqs.(16), (17) and (19). The superscript symbolizing the sun is to remind us that only direct solar radiation is being dealt with. The diffuse component,  $t^*$  may generally be defined as  $t - t^\odot$ . As we did not allow for instantaneous values, the direct transmissivities are only averages, defined for appropriate “effective” air

masses  $1/\mu_x^+$ , in agreement with the averaging periods laid down.

The transparency for overcast conditions is then, from (41), (42) and (44),

$$T(0) = a = t_u^\odot t_c t_l^\odot. \quad (45)$$

In this limiting case, the transparency is just the product of the direct transmissivities  $t_u^\odot$ ,  $t_l^\odot$  and the total transmissivity  $t_c$  of the cloud layer. Direct transmissivities are controlled by the absorption of ozone, water vapor, carbon dioxide, as well as other gases of minor importance; the transmissivity of the cloud layer is affected largely by scattering within the cloud layer, brought about by the air molecules and the cloud elements, and to a lesser degree by absorption of solar energy in water vapor and radiatively active gases, and also by the water itself, albeit this is normally held to be negligible.

Let us turn to the other limiting condition, that of a sunny, cloudless atmosphere. Then (41), together with Eqs. (42), (43) and (44) yield

$$T(1) = a + b = t_u^\odot t_c t_l^\odot + t_u^\odot (t_\Delta - t_c) t_l^\odot = t_u^\odot t_\Delta t_l^\odot \quad (46)$$

which makes perfectly sense, because now we get the transparency of the atmosphere by multiplying all three (cloudless) transmissivities together, that of the middle atmosphere being the (sum of direct and diffuse) transmissivity of the air in the absence of clouds (the "interstitial" transmissivity  $t_\Delta$ ).

Note that from Eqs. (1), (6) and (41),  $a_A = a/(a+b)$ ,  $b_A = b/(a+b)$ , and thus  $a_A$  is seen to be the ratio of the transparency of the overcast atmosphere to that of the cloudless one, in conformity with Ångström's original meaning.

It should be clear from the preceding account that the classic linear relationship between clearness index (transparency) and relative sunshine duration, known as the Ångström-Prescott formula, cannot, on our grounds, be expected to be valid unless the surface albedo is low and the optical thickness of the cloudless parts of the atmosphere due to (non-conservative) scattering is negligible.

**3.2.5. Cloudless and non-scattering model atmosphere.** In this situation we have:  $n = 0$  (i.e.  $\eta = 1$ );  $a_u = a_\Delta = a_l = 0$ . Therefore,  $r_u = r_\Delta = r_l = 0$  and, choosing the

same  $\mu^+$  for every layer (cf. also Eq.(51) below),

$$\begin{aligned} T(1) &= t_u^\odot t_\Delta^\odot t_l^\odot = e^{-\tau_1/\mu^+} e^{-\tau_2/\mu^+} e^{-(\tau_b - \tau_1 - \tau_2)/\mu^+} \\ &= e^{-\tau_b/\mu^+}. \end{aligned} \quad (47)$$

A possible choice for the effective air mass  $1/\mu^+$  is  $-\log[2E_3(\tau_b)]/\tau_b$  (Pelkowski 2007), for then the transparency would correspond to the annual global mean of the direct transmissivity, with the exponential function being replaced by twice the exponential integral  $E_3(\tau_b)$ , which is just what one gets for the so-called direct spherical transmissivity (Chevallier et al. 2007, Pelkowski 2007). There are other possibilities to define an effective air mass which we need not discuss here.

If total optical depth is expressible as the sum of the optical depths due to ozone, water vapor, well-mixed absorbing gases and aerosol absorption, then  $\tau_b = \tau_{b,O_3} + \tau_{b,H_2O} + \tau_{b,mg} + \tau_{b,aer}$  and we could write the transparency of the atmosphere as

$$T(1) = e^{-\tau_b/\mu^+} = \mathcal{T}_{O_3} \mathcal{T}_{H_2O} \mathcal{T}_{mg} \mathcal{T}_{aer},$$

which is what one often finds in studies of (direct or beam) solar radiation at the surface of the Earth (cf., e.g., Kambezidis & Psiloglou 2008).

**3.2.6. Conservative cloud layer with overcast skies over black surface.** This situation is described by  $r_c + t_c = 1$ ,  $n = 1$  and  $r_s = 0$ . Then, from (33), (34) and (38), together with (24),

$$\begin{aligned} T(0) &= a_0 \\ &= t_u(1-r_c)t_l[1+r_u r_l + r_c(r_u+r_l-2r_u r_l)]. \end{aligned} \quad (48)$$

If in addition the cloudless air would not scatter solar radiation, this expression would reduce to Eq. (45). It is well known that for a conservative cloud the transmissivity is given by

$$t_c = \frac{\mu_c^+}{\mu_c^+ + (1-f_c)\tau_{cb}}, \quad (49)$$

$\tau_{cb}$  being the optical depth of the cloud layer. Petty (2006) derives (49) for  $\mu_c^+ = 0.5$ , but it has often been presented for  $\mu_c^+ = 1$ . Some flexibility is gained by allowing  $\mu_c^+$  to assume any value between 0 and 1, but how should we choose it? A criterion discussed in my previous work (Pelkowski 2007) is to demand that this cloud transmissivity reproduce the rigorous value in the case of isotropic scattering, which corresponds to  $f_c = 0.5$ , for then there exist exact expressions (cf., e.g., Rutily et al. 2008). For the sake of illustration, suffice it to quote the value  $\mu_c^+ = 0.663$  for a cloud of optical depth  $\tau_{cb} = 16$  (Pelkowski 2007). Of course, one may stick

to a single constant value for  $\mu_c^+$  if one wishes to eschew the onerous review of the formulae involved. A typical value found in the literature is  $\mu_c^+ = 1/\sqrt{3}$  (the "diffusivity factor").

For the transparency (45) we can now write  $\mathcal{T}(0) = t_u^\odot t_l^\odot / [1 + (1 - f_c)\tau_{cb}/\mu_c^+]$ . It is diminished by the presence of the cloud layer (unless  $f_c = 1$ , which case is tantamount to no cloud at all). If the cloud elements would strongly backscatter ( $f_c \ll 1$ )—which they do not—, the transparency of the atmosphere would fall more than for the case of isotropic or Rayleigh scattering ( $f_c = 0.5$ ).

**3.2.7. The general limit transparencies.** In the general case for which we obtained the polynomial equation (33), we may write for the limiting transparencies the following equations:

$$\mathcal{T}(0) = a_0 = t_u t_c t_l [1 + r_s r_l + (1 - r_s r_l)\Gamma_c] \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{T}(1) &= a_0 + a_1 + a_2 + a_3 \\ &= t_u t_\Delta t_l [1 + r_s r_l + (1 - r_s r_l)\Gamma_\Delta] \end{aligned} \quad (51)$$

where

$$\Gamma_x = r_x(r_u + A_l) - r_u A_l(r_x^2 - t_x^2) \quad x = c \text{ or } \Delta \quad (52)$$

In periods of overcast skies, the transparency of the model atmosphere is enhanced over a reflecting surface; likewise, for cloudless conditions we discern that it also increases over places whose surfaces are not black. I shall illustrate this in the next subsection, devoted to the diffuse transmissivity of one of our specialized model atmospheres.

**3.2.8. Diffuse transmissivities under cloudy skies.** By subtracting the direct transmissivity from the transparency (or total transmissivity) given by (33), we get the diffuse transmissivity  $\mathcal{T}_*(\eta) = Q_*^\downarrow(\tau_b)/Q^\downarrow(0)$ . By (14) it may be written in terms of the diffuse fraction (13) as  $\mathcal{T}_*(\eta) = \mathcal{DT}(\eta)$ .

A little reflection will make it plain that the direct radiation is given by

$$\mathcal{T}_\odot(\eta) = t_u^\odot [(1 - \eta)t_c^\odot + \eta t_\Delta^\odot] t_l^\odot, \quad (53)$$

with  $t_x^\odot = \exp[-\tau_{xb}/\mu_x^+]$ . Then  $\mathcal{T}_*(\eta) = \mathcal{T}(\eta) - \mathcal{T}_\odot(\eta)$ .

Let us now consider the simplified model atmosphere consisting of both air that does not scatter radiation at all ( $a_u = a_\Delta = a_l = 0$ ) and perfectly scattering clouds

( $r_c + t_c = 1$ ). Its diffuse transmissivity may be shown to be expressible as

$$\mathcal{T}_*(\eta) = t_u^\odot t_l^\odot (1 - \eta) \{t_c^* + r_s t_l^{\odot 2} (1 - t_c) [t_c (1 - \eta) + t_\Delta^\odot \eta]\}, \quad (54)$$

where by Eq. (49) and  $t_c^\odot = e^{-\tau_{cb}/\mu_c^+}$ ,

$$t_c^* = \frac{1}{1 + (1 - f_c)\tau_{cb}/\mu_c^+} - e^{-\tau_{cb}/\mu_c^+}. \quad (55)$$

The singular case  $f_c = 1$  leads to  $t_c = 1$  and hence  $r_c = 0$ , which is equivalent to  $a_c = 0$ , i.e.  $\tau_{cb} = 0$  and thence  $t_c^\odot = 1$  as well as  $t_c^* = 0$ .

From (54) the diffuse transmissivity under overcast conditions follows at once

$$\mathcal{T}_*(0) = t_u^\odot t_l^\odot [t_c^* + r_s t_l^{\odot 2} (1 - t_c) t_c] \quad (56)$$

while that for cloudless skies is simply

$$\mathcal{T}_*(1) = 0,$$

as we expect it to be.

With an overcast sky, there are two extreme values for which the diffuse transmissivity (56) vanishes:  $t_c = 1$  (the singular case described before, amounting to a cloud layer with "invisible clouds") and  $t_c = 0$  (optically deep clouds,  $\tau_{cb} \rightarrow \infty$ ).

For all values  $\eta < 1$ ,  $\mathcal{T}_*(\eta)$  has a maximum for a certain value of  $\tau_{cb}$ , say  $\hat{\tau}_{cb}$ . The diffusive transmissivity first increases with the optical thickness of the cloud, up to the value  $\hat{\tau}_{cb}$ , thence slowly decreases for  $\tau_{cb} > \hat{\tau}_{cb}$ .

If the ground albedo is low or vanishes, the diffuse transmissivity simplifies to

$$\mathcal{T}_*(\eta) = t_u^\odot t_l^\odot (1 - \eta) t_c^*, \quad (57)$$

and under overcast skies  $\mathcal{T}_*(0) = t_u^\odot t_l^\odot t_c^*$ . Clearly, the diffuse transmissivity over a reflecting ground (or sea) is greater than over a black surface, unless the cloud layer is very deep.

If instead of non-scattering air overlying a reflecting surface we consider (besides the scattering clouds) a scattering lower atmospheric layer resting on a black surface, we would get the following diffuse transmissivity ( $r_u = r_\Delta = r_s = 0; r_l \neq 0$ ):

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_*(\eta) &= t_u^\odot \{ [t_c t_l (1 - \eta) + t_\Delta^\odot t_l^* \eta] [1 + r_c r_l (1 - \eta)] \\ &\quad + t_l^\odot (1 - \eta) (t_\Delta^\odot r_c r_l \eta - t_c^\odot) \}. \end{aligned} \quad (58)$$

For overcast skies, this yields  $\mathcal{T}_*(0) = t_u^\odot [t_c t_l (1 + r_c r_l) - t_l^\odot t_c^\odot]$ , while for clear skies we get  $\mathcal{T}_*(1) = t_u^\odot t_\Delta^\odot t_l^* > 0$ , the latter positive contribution being due to the scattering in the lower atmosphere.

Although we could examine the general case (for  $r_x \neq 0$ ,  $x \in \{\Delta, l, s, u\}$ ), we will forgo the resulting lengthy formula for the diffuse transmissivity, as no new qualitative inferences will follow from it.

#### 4. Discussion

The literature on the Ångström-Prescott and similar equations has been reviewed by **Akinoglu** (2008), whom I will be citing below. To avoid the clumsy repetition of the publication year in parenthesis, in this section I shall omit it on the understanding that his survey is always being referred to.

**Akinoglu** states that the Ångström coefficients  $a$  and  $b$  “have been expressed in terms of different geographical and climatic parameters such as latitude, altitude, sunshine fraction”, and he concludes that those coefficients “depend on all physical, spatial and the dynamic properties of the atmosphere at the region of interest”. Our model makes this conclusion compelling, because the different transmissivities are quantities certainly varying “dynamically” from one place to another (geographically).

After a short review of earlier attempts, **Akinoglu** presents a model of his own that produces a quadratic expression in the fractional sunshine duration, with corresponding coefficients, the first of which in our notation reads  $a_0 = t_u t_\Delta t_l t_c (1 + r_s r_c)$  (the quantities being effective ones, not dependent upon wavelength). Let us compare this expression with what results from (40) when we assume  $r_u = r_l = 0$ . Then, in view of Eqs. (50) and (52), we get  $\mathcal{T}(0) = a_0 = t_u t_c t_l (1 + r_c r_s t_l^2)$ . If furthermore we assume that the lower atmosphere does not absorb solar radiation, then  $t_l = 1$  and  $a_0 = t_u t_c (1 + r_c r_s)$ , which can finally be made to coincide with **Akinoglu**’s expression if we also require the interstices of the middle atmosphere to be transparent (i.e.,  $t_\Delta = 1$ ). The other two coefficients proposed by **Akinoglu** are more difficult to compare, because they involve “the atmospheric forward scattering coefficient”, as well as “the total atmospheric back-scattering”, which seem to be what we call reflectivities. The latter “can be defined with two components” (and seemingly corresponds to our  $r_n$ ). It seems to me that if **Akinoglu**’s “forward scattering coefficient” is set to zero (being already accounted for in the reflectivities of our model), and if his  $t_\Delta t_c$  is always properly read to mean only  $t_c$ , then the coefficients can be made to agree! But however well the coefficients he

proposes and those in our work might eventually compare, I cannot help calling his “derivation” at best a felicitous *ad hoc* attempt to confer a definite meaning to the coefficients of polynomial regression.

In discussing the merits of a quadratic regression between transparency and relative sunshine duration, **Akinoglu** suggests three reasons for “non-linearity”, among which one is a conjecture based on his model of the physical meaning of the three coefficients in the quadratic regression (his  $a_0$  quoted above being among them): “Finally, back-scatter effects may lead to a non-linear term [in] the relation between  $\mathcal{T}$  and  $\eta$ ...”. From our standpoint, this is again a compelling conclusion, since a necessary condition for a quadratic formula relating the quantities in question is that the surface be non-black ( $r_s \neq 0$ ), i.e. that there exist “back-scatter effects”.

**Akinoglu** cites evidence showing that the quadratic form fits daily data of two locations in Turkey better than does the linear Ångström-Prescott formula. He gives numerical values for the coefficients of the quadratic regression, first for daily and then for monthly averages, those of the latter being  $a_0 = 0.195$ ,  $a_1 = 0.676$ , and  $a_2 = -0.142$ . Appealing to expression (40) when  $r_u = 0$  (for then the quadratic form arises naturally in our scheme), we obtain from (36) for the third coefficient  $a_2 = t_u (t_\Delta - t_c) t_l (1 - r_s r_l) (r_\Delta - r_c) A_l$ , which under normal conditions we expect to be negative, since  $t_\Delta - t_c > 0$ ,  $r_\Delta - r_c < 0$ . The same conclusion is arrived at if  $r_u = r_l = 0$ , bearing out **Akinoglu**’s quoted signs for  $a_2$ .

**Şahin and Şen** (2008) point out that the coefficients of the linear or quadratic transparency are not constant in time. **Akinoglu** states that they have values depending on the averaging interval. We may say that, once more, their conclusions are by no means surprising against the background of our present model.

#### Conclusion

Modeling surface irradiation, by relating it to the widely measured sunshine at many places of the world through the simple linear Ångström-Prescott regression formula, has a respectable history. The need for an extension to include quadratic or even third-order polynomial regression has been increasingly felt in recent years. Many statistical analyses have been carried out on this basis, and many more will follow, including innovative approaches to parameter estimation (**Badescu** 2008).

However, the attempts to furnish a physical interpretation of the regression coefficients have been largely *ad hoc*. Here, instead, we submit a rationale for such models, based on a two-stream approximation of the vertical fluxes crossing an atmosphere fashioned from three characteristic layers, an approximation which in turn rests firmly on the phenomenological theory of radiative transfer through planetary atmospheres.

For years to come, simple and even simplistic models will be needed in order to cope with the practical issues regarding the mutual relation between insolation and relative sunshine duration at sites suffering from a lack of spatial and temporal coverage. A definite conclusion that we draw from this work is that the classic linear Ångström-Prescott formula cannot be expected to be a good regression equation when air scattering and ground reflectivity are *not* negligible. In these cases, at least a quadratic formula between the “clearness index” and the relative sunshine is required; a still better regression when scattering prevails ought to be a third-order polynomial. Even more, a polynomial of higher order would be called for if we wished to infer the meteorological parameters of the model by solving what is known as the inverse problem.

## References

- Akinoglu, B.G.**, 2008: *Recent advances in the relations between bright sunshine hours and solar irradiation*. In: Badescu, V. (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*, Springer, Berlin, pp. 115–143.
- Ångström, A.**, 1924: *Solar and terrestrial radiation*. Q.J. Roy. Meteor. Soc., 50, 121–126.
- Badescu, V.** (Ed.), 2008: *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*, Springer, Berlin, 517 pp.
- Bohren, C. F.**, 1987: *Multiple scattering of light and some of its observable consequences*. American Journal of Physics, Vol. (55) 6, 524–533.
- Chevallier, L., Pelkowski, J., Rutily, B.** 2007: *Exact results in modeling planetary atmospheres—I. Gray atmospheres*. J. Quant. Spectr. Rad. Transf. (JQSRT), 104, 357–376.
- Guyot, G.**, 1998: *Physics of the Environment and Climate*. John Wiley & Sons (Praxis Publishing) Chichester, 632 pp.
- Ianetz, A., Kudish, A.**, 2008: *A method for determining the solar global and defining the diffuse and beam irradiation on a clear day*. In: Badescu (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*, Springer, Berlin, pp. 93–113.
- Boland, J., Ridley, B.**, 2008: *Models of diffuse solar fraction*. In: Badescu (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*, Springer, Berlin, pp. 193–219.
- IDEAM & UPME**, 2005: *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia, Bogotá, 176 pp.
- Kambezidis, H.D., Psiloglou, B.E.**, 2008: *The meteorological radiation model (MRM): advancements and applications*. In: Badescu (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*, Springer, Berlin, pp. 357–392.
- Kokhanovsky, A.A.**, 2006: *Cloud Optics*. Springer, Dordrecht, 276 pp.
- Kondratyev, K.Ya.**, 1969: *Radiation in the Atmosphere*. Academic Press (Elsevier Inc.), New York, p. 312.
- Pelkowski, J.**, 2007: *El albedo terrestre*. Rev. Acad. Colomb. Cienc., 31 (121), 499–520.
- Petty, G.W.**, 2006: *A First Course in Atmospheric Radiation*. Second Edition. Sundog Publishing, Madison, 458 pp.
- Prescott, J.A.**, 1940: *Evaporation from water surface in relation to solar radiation*. Trans. Royal Society Australia, 40, 114–116.
- Robinson, N.** (Ed.), 1966. *Solar Radiation*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 347 pp.
- Rutily, B., Chevallier, L., Pelkowski, J., Bergeat, J.**, 2008: *Exact results in modeling planetary atmospheres—II. Semi-gray atmospheres*. J. Quant. Spectr. Rad. Transf. (JQSRT), 104, 28–42.
- Şahin, A. D., Şen, Z.**, 2008: *Solar irradiation estimation methods from sunshine and cloud cover data*. In: Badescu (Ed.), *Modeling Solar Radiation at the Earth Surface*, Springer, Berlin, pp. 145–173.

Recibido el 16 de diciembre de 2007

Aceptado para su publicación el 20 de marzo de 2008

# THE COMPLETE NUCLEOTIDE SEQUENCE OF THE GENOMIC RNA OF *BEAN COMMON MOSAIC VIRUS* STRAIN NL4

by

Enrique Bravo<sup>1</sup>, Lee A. Calvert<sup>2</sup> & Francisco J. Morales<sup>2</sup>

## Abstract

**Bravo, E., L. A. Calvert & F. J. Morales:** The complete nucleotide sequence of the genomic RNA of *Bean common mosaic virus* strain NL4. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(122): 37-46, 2008. ISSN 0370-3908.

The complete nucleotide sequence of the genomic RNA of the NL4 strain of *Bean common mosaic virus* (BCMV-NL4) was determined. The viral genome is 10037 nucleotides in length, excluding the 3' terminal poly (A) tail, and contains a single open reading frame (ORF) of 9666 nucleotides encoding a polyprotein of 3222 amino acids. The ORF is flanked by 5' and 3' untranslated regions (UTRs) of 133 and 235 nucleotides, respectively. Comparative analyses of the predicted BCMV-NL4 polyprotein with other species of the genus *Potyvirus* revealed nine cleavage sites resulting in ten functional proteins. Nucleotide and amino acid sequence identities indicated a close relationship between BCMV-NL4 and BCMV-NL1. Blast comparisons using coat protein (CP) and 3'UTR sequences showed 100% identity between BCMV-NL4 and the Mexican variant (US6) of this strain.

**Key words:** BCMV-NL4, potyvirus, genomic RNA, complete sequence, mexican strain.

## Resumen

Se determinó la secuencia completa del ARN genómico del Virus del mosaico común del frijol (*Bean common mosaic virus*) cepa NL4 (BCMV-NL4). El genoma viral consta de 10037 nucleótidos excluyendo la cola de poli (A) y contiene una trama de lectura abierta (ORF) de 9666 nucleótidos que codifica una poliproteína de 3222 aminoácidos. La ORF está flanqueada por dos regiones no traducidas (UTR): la 5'UTR de 133 nucleótidos y la 3'UTR de 235 nucleótidos. Análisis comparativos de la poliproteína del BCMV-NL4 con otras especies del género *Potyvirus*, reveló nueve sitios de clivaje que resultaron en las diez proteínas funcionales características de estos virus. Alineamientos múltiples de las secuencias de nucleótidos del ARN genómico y de aminoácidos de la poliproteína del BCMV-NL4 con las de otros miembros de la familia *Potyviridae* mostraron una relación estrecha entre el BCMV-NL4 y el BCMV-NL1. Las comparaciones mediante el uso del programa Blast de las secuencias de la proteína de la cápsida (CP) y de la 3'UTR, mostraron una identidad del 100% entre el BCMV-NL4 y la variante mexicana (US6) de esta cepa.

**Palabras clave:** BCMV-NL4, potyvirus, ARN genómico, secuencia completa, cepa mexicana.

<sup>1</sup> Department of Biology, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

<sup>2</sup> International Center for Tropical Agriculture, CIAT, Palmira, Colombia.

## Introduction

*Bean common mosaic virus* (BCMV) is a species of the genus *Potyvirus* within the family *Potyviridae*. BCMV consists of flexuous filaments approximately 15 x 750 nm containing a molecule of single-stranded, positive-sense RNA of approximately 10 kb. The viral genome is expressed as a polyprotein of about 370 kDa that is cleaved by viral-encoded proteinases into ten functional proteins. A protein (VPg) is attached to the 5'-end of the genomic RNA and it has a poly (A) tail at its 3'-end<sup>7, 20</sup>.

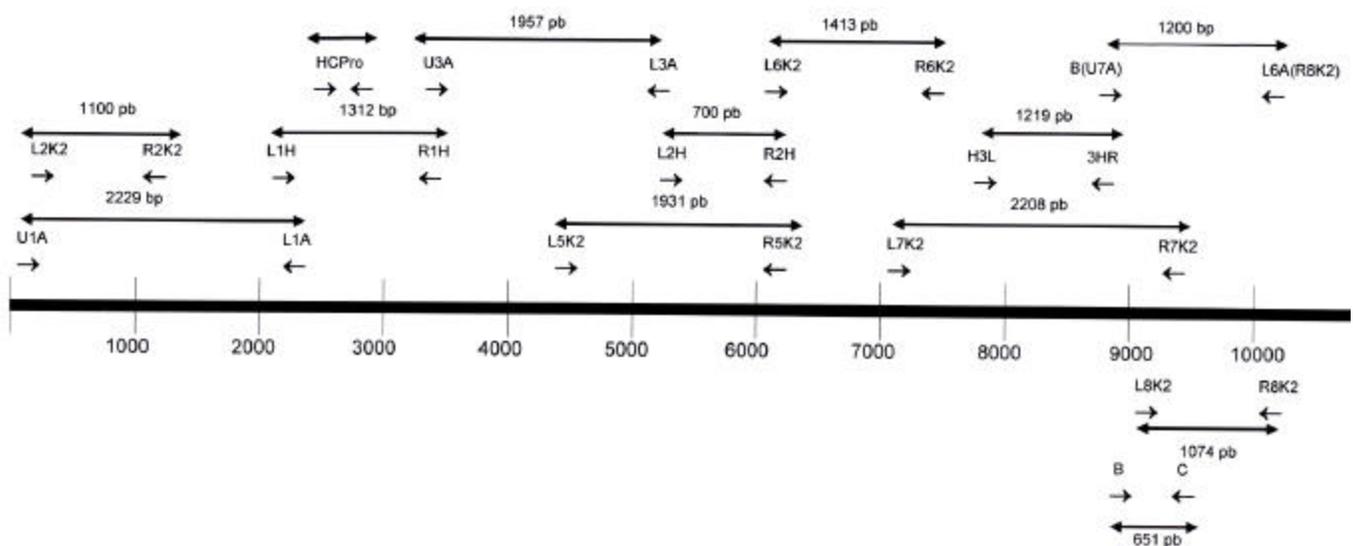
Plant viruses are characterized according to different criteria, including their physicochemical properties, nucleic acid, proteins, genome organization, antigenic and biological properties. The characterization and taxonomic classification of viruses, however, requires the molecular analysis of the viral genome. In the case of potyviruses, the 3'UTR and coat protein gene have been often used to produce partial sequences for taxonomic purposes<sup>11, 24</sup>. To date, the complete genomes of over 50 different potyviruses have been sequenced, including the Type strain (NL1) of BCMV and some legume potyviruses recently re-classified as strains of BCMV (e.g. Blackeye cowpea mosaic virus), and other BCMV isolates, including BCMV-RU1, BCMV-cowpea isolate R, and BCMV-cowpea isolate Y.

The NL4 strain of BCMV was first isolated in 1963 by Hubbeling in the Netherlands, from the common bean cultivar Great Northern 123<sup>10</sup>. A similar BCMV strain was identified the following year by Silbernagel in a common bean line from Mexico (the 'Mexican strain')<sup>23</sup>. These vi-

ruses were considered as variants of a single BCMV strain belonging to pathogenicity group VII<sup>10</sup>. Both viruses were later shown to be pathogenic to group 6 of common bean genotypes which possess the resistance gene *bc 2*<sup>2</sup>, that confers resistance to necrosis-inducing strains of BCMV and *Bean common mosaic necrosis virus* (BCMNV). The Great Northern and Mexican variants also induce mosaic in common bean genotypes possessing resistance genes *bc 1* and *bc 1*<sup>210</sup>. In this study, the nucleotide sequence of the complete genome of BCMV-NL4 is reported and its genomic structure is compared to other BCMV strains and BCMNV.

## Materials and methods

The BCMV-NL4 isolate used in this investigation has been maintained at the Virology Research Unit of CIAT in infected seeds of the common bean cultivar *Dubbele Witte* since the late 1970s. The virus was replicated by mechanical inoculation onto primary leaves of seedlings of bean cultivar *Redlands Geenleaf C* under glasshouse conditions<sup>18</sup>. Virus particles were partially purified following an existing protocol<sup>17</sup> and the RNA was extracted using the RNAeasy kit (QIAGEN). Twenty two pairs of primers were designed, based either on the conserved genomic regions identified from multiple alignments of reported sequences of potyviruses, or based on the partial sequences obtained in this investigation for BCMV NL4. The primers that were used for the complete genome amplification and their location are shown in Table 1 and Figure 1, respectively.



**Figure 1.** Positions of the primers used for the amplification of genome of BCMV-NL4

**Table 1.** Primers used for the amplification of the BCM -NL4 genome.

Primer	Sequence 5' 3'	Position	Direction
U1A	AAAAATTTAAAACAACACTCAT	1-19	sense
L1A	AAGGGCACTATCAAAGATC	2229-2211	antisense
L2K2	CTGTAGGATGCTCAGCACGA	279-297	sense
R2K2	TGACATAAAGGGCTGTTGAGTG	1383-1367	antisense
HCPProL3	GGATGTACATTGCAAAAAGAAGG	2463-2484	sense
HCPProR2	TCAGGAGCGAAGGTGAAACT	2966-2948	antisense
L1H	CCTAATGGGCAAAGGGAGTT	2183-2201	sense
R1H	CGCAGTTGTGAAACAATCGT	3469-3451	antisense
U3A	TAAGCTTGTTGGAAAAATC	3329-3348	sense
L3A	AGTGGTGTAAGCTCAAAAT	5304-5285	antisense
L5K2	AATCAACAAGCCTCCCACAC	4302-4320	sense
R5K2	TGCTGCCTTTTTGCTTACCT	6233-6215	antisense
L2H	TGCGATGCATCCTGAGATTTC	5335-5353	sense
R2H	ATCCAGCCACCACCAAGCAG	6042-6024	antisense
L6K2	TGTTCACTGCTTGGTGGT	6015-6033	sense
R6K2	TTTCCTTCGGGCTGATTCTA	7428-7409	antisense
L7K2	TGGGCTCATAGTTGGGTTTC	7141-7159	sense
R7K2	CCACACCATAAAGCCATTCA	9349-9331	antisense
H3L	GCAGTCGGAGCACAATACAA	7792-7810	sense
3HR	TCCACACCAGCATCCACTAC	8985-8967	antisense

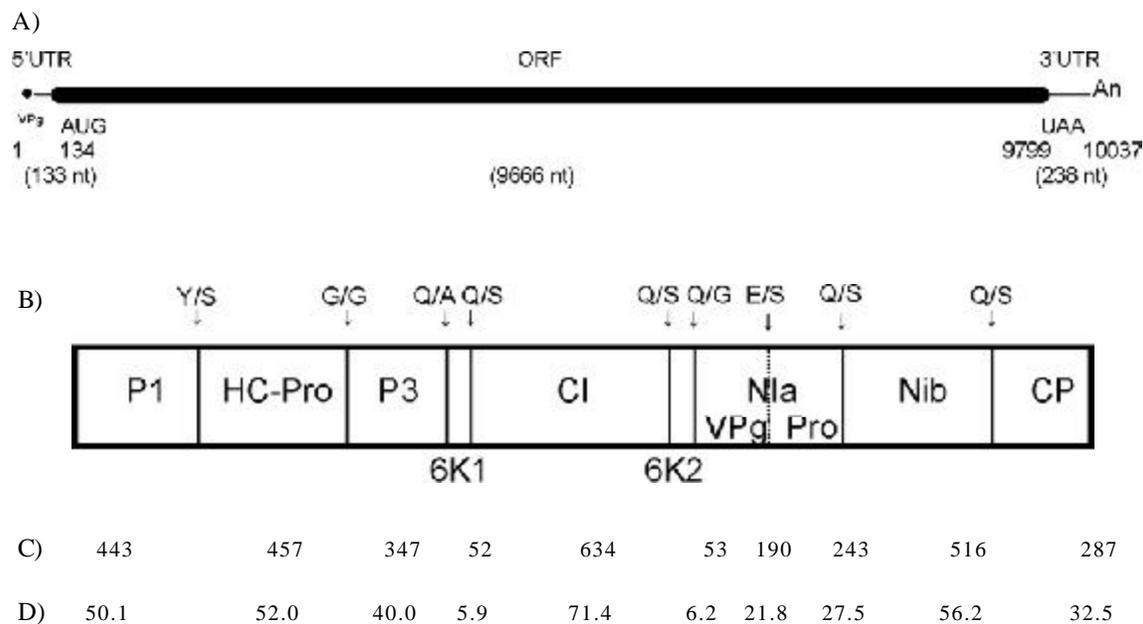
The viral RNA was amplified using RT-PCR and the products were cloned using the PCR TA Cloning Kit (Invitrogen). About fifty clones with overlapping sequences comprising the whole viral genome were sequenced. Additional sequence information was generated by direct sequencing of selected PCR products. The sequence was determined by using the program Sequencher 4.1 (Gene Code Corporation). The program DNAMAN 4.13 (Lynnon BioSoft) was used to convert the nucleotide sequences to amino acids.

## Results and discussion

The full-length nucleotide sequence of BCMV-NL4 was deposited in the GenBank with the accession number **DQ666332**. The full-length genomic sequence (excluding the poly A tail) is 10037 nucleotides long and has a 5' untranslated (UTR) region of 133 nt, a single open reading frame (ORF) and a 3'UTR of 235 nt. The ORF has two possible translation start codons. The first AUG codon is at position 134 to 136, and the second codon is at position 146 to 148. Only the first codon AUG is located in the optimum context (A/G)AAAUGGC for initiation of translation in dicotyledon plants and many potyviruses<sup>9, 13</sup>. Using this codon, the ORF (nucleotides 134 to 9799) encoded a polyprotein of 3222 amino acids. The 5'UTR has a high content of AU (68.4%) and a low content of GC (31.6%) similar to values reported for other potyviruses; and included the sequences AAGACAACA (9 nt, from 21 to 29)

and UCAAGCAA (8 nt, from 68 to 75), which correspond to "potybox a" and "potybox b", respectively<sup>26</sup>. The 5'UTR is also rich in CAA, similar to the translation regulatory elements found in the leader sequence of *Tobacco mosaic virus (Tobamovirus)*, which functions to stimulate translation<sup>13</sup>. Analysis of the BCMV-NL4 5'UTR with the RegRNA program (<http://regrna.mbc.nctu.edu.tw/>) showed two pyrimidine base rich tracts: CUUCUUUCUCUCG (13 nt, from 52 to 64) and CUUUCUUUG (9 nt, from 111 to 119). These tracts are similar to the "terminal oligopyrimidine tract (TOP)" found at the 5' terminal region of mRNAs of many vertebrates, which has been associated with translation control<sup>15</sup>. The 3'UTR contains a yeast-like signal consensus sequence for the poly (A) tail, UAUGA at position 9962 to 9966<sup>13</sup>. A comparison of the BCMV-NL4 polyprotein with those of other potyviruses showed nine cleavage sites for viral proteinases with the capacity to produce ten proteins characteristic of potyviruses (Table 2 and figure 2).

Several potyvirus-conserved motifs were identified in the BCMV-NL4 polyprotein sequence. The motifs H-X<sub>10</sub>-D-X<sub>27</sub>-G-D-S-G (amino acids 356 to 398) and FMIIRG (amino acids 416 to 421) were identified as the conserved proteolytic domains of serine proteases, which are located in the carboxylic end of P1 protein<sup>21</sup>. In the amine end region of the HC-Pro protein, the motif C-X<sub>8</sub>-C-X<sub>18</sub>-C-X<sub>2</sub>-C (amino acids 471 to 502) was identified and it corresponded to the "zinc finger"<sup>21</sup>, and the motif KLSC (496 to 499) associated



**Figure 2.** Organization of Bean Common Mosaic Virus NL4 strain genome. A) Structure of genomic RNA. B) Structure of the polyprotein indicating the amino acids at the cleavage sites for viral proteinases. Number of amino acids (C) and calculated molecular mass in kDa (D) of the mature proteins based on the translation of the genomic sequence.

**Table 2.** Cleavage sites in BCMV-NL4 polyprotein. Residues strongly conserved at the positions -4 and -2 in the context sequences are underlined.

Position in the polyprotein	Cleavage sites (amino acids)	Mature protein	Size (amino acids)
443-444	<u>I</u> H <u>H</u> Y/S	P1	443
900-901	YR <u>V</u> G/G	HC-Pro	457
1247-1248	<u>V</u> S <u>V</u> Q/A	P3	347
1299-1300	<u>Y</u> Q <u>Y</u> Q/S	6K1	52
1933-1934	VRLQ/S	CI	634
1986-1987	<u>V</u> TTQ/G	6K2	53
2176-2177	<u>V</u> TT <u>E</u> /S	Nla-Vpg	190
2419-2420	VATQ/S	Nla-Pro	243
2935-2936	VHLQ/S	Nib	516
		CP	287

with aphid transmission<sup>19</sup>. In the middle region of HC-Pro, the motif FRNK (623 to 626) was identified, which has been associated with aphid transmission and symptom expression<sup>12</sup>. Towards the carboxylic end of HC-Pro (734 to 736), the motif CCC, which is implicated in systemic movement and interaction with the coat protein<sup>4, 27</sup>, and the motif GYCY (784 to 787), which is conserved at the active site of cysteine proteinases<sup>4</sup>, were identified. In the amine end region of the P3 protein, the sequence DPY-X<sub>7</sub>-SP-X<sub>2</sub>-L-X-H-X<sub>2</sub>-R-X-R-X<sub>2</sub>-E-X<sub>5</sub>-W (amino acids 930 to 960) was

found, which is similar to the conserved motif EPYX<sub>7</sub>SPX<sub>2</sub>LXAX<sub>2</sub>NXGX<sub>2</sub>EX<sub>5</sub>N<sup>20</sup>. Two conserved motifs for binding of nucleotides, characteristic of RNA helicases, were found at the amine end region of the CI protein: GAVGSGKST (amino acids 1384 to 1392) and PTR (amino acids 1410 to 1412)<sup>14</sup>. The sequences KVSAT (1500 to 1504), LVYV (1551 to 1554), VATNIIENGVTL (1602 to 1613) and GERIQRLGRVGR (1646 to 1657), conserved in protein helicases<sup>16</sup> were identified in the CI protein. The residues H<sub>2222</sub>, D<sub>2257</sub> and C<sub>2326</sub> found in the Nla protease of BCMV-NL4 constitute a triad in the catalytic domain of Nla proteinases<sup>8</sup>. The motifs HCHADGS (2662 to 2668), GNNSGQPSTVVDNTLMV (2725 to 2741) and GDD (2769 to 2771), conserved at the catalytic domains of RNA dependent RNA polymerases (RdRpol)<sup>6, 27</sup>, were identified in the Nib protein. The motif DAG (2947 to 2949), which has been implicated in aphid transmission, was located in the amine end region of the CP. The conserved residues R<sub>3128</sub> and D<sub>3165</sub> were also found and are considered essential for virion assembly<sup>27</sup>.

The complete nucleotide sequences and the predicted amino acid sequences of 47 viruses of the family *Potyviridae* and 7 strains or isolates of BCMV were aligned and were compared with the sequence of BCMV-NL4 using the CLUSTALW multiple sequence alignments pro-

gram. The viruses were: *Agropyron mosaic virus* (AgMV, AY623626), *Bean common mosaic necrosis virus* (BCMN, U19287), *Bean yellow mosaic virus* (BYMV, D83749), *Beet mosaic virus* (BtMV, NC\_005304), *Brome streak mosaic virus* (BrSMV, NC\_003501), *Chilli veinal mottle virus* (ChiVMV, AJ237843), *Clover yellow vein virus* (CIYV, AB011819), *Cocksfoot streak virus* (CSV, AF499738), *Cowpea aphid-borne mosaic virus* (CABMV, AF348210), *Daphne virus Y* (DVY, DQ299908), *Dasheen mosaic virus* (DsMV, AJ298033), *East Asian passiflora virus* (EAPV, AB246773), *Hordeum mosaic virus* (HoMV, AY623627), *Japanese yam mosaic virus* (JYMV, AB027007), *Johnsongrass mosaic virus* (JGMV, Z26920), *Konjak mosaic virus* (KoMV, AB219545), *Leek yellow stripe virus* (LYSV, AJ307057), *Lily mottle virus* (LMoV, AJ564636), *Maize dwarf mosaic virus* (MDMV, AJ001691), *Onion yellow dwarf virus* (OYDV, AJ510223), *Papaya leaf distortion mosaic virus* (PLDMV, BD171712), *Papaya ringspot virus* (PRSV, X67673), *Pea seed-borne mosaic virus* (PSbMV, D10930), *Peanutmottle virus* (PeMoV, AF023848), *Pennisetum mosaic virus* (PenMV, AY642590), *Pepper mottle virus* (PepMoV, M96425), *Peru tomato mosaic virus* (PTMV, AJ437280), *Plum pox virus* (PPV, D13751), *Potato virus A* (PVA, AJ296311), *Potato virus V* (PVV, AJ243766), *Potato virus Y* (PVY, X12456), *Scallion mosaic virus* (ScaMV, AJ316084), *Shallot yellow stripe virus* (SYSV, AJ865076), *Sorghum mosaic virus* (SrMV, AJ310197), *Soybean mosaic virus* (SMV, D00507), *Sugarcane mosaic virus* (SCMV, AJ97628), *Sweet potato feathery mottle virus* (SPFMV, D86371), *Thunberg fritillary mosaic virus* (TFMV, AJ851866), *Tobacco etch virus* (TEV, M11458), *Tobacco vein mottling virus* (TVMV, X04083), *Turnip mosaic virus* (TuMV, AF169561), *Watermelon mosaic virus* (WMV, AY437609), *Wild potato mosaic virus* (WPMV, AJ437279), *Wisteria vein mosaic virus* (WVMV, AY656816), *Yam mosaic virus* (YMV, U42596) and *Zucchini yellow mosaic virus* (ZYMV, AF127929). The BCMV strains and isolates in this analysis were: *Bean common mosaic virus* (BCMV, AJ312437), BCMV-NL1 (AY 112735), BCMV-RU1 (AY 863025), BCMV-cowpea isolate R (AJ 312437), BCMV-cowpea isolate Y (AJ 312438), BCMV-Blackeye cowpea mosaic virus (BICMV, AY 575773), and BCMV-Peanut stripe virus (PStV, U 34972).

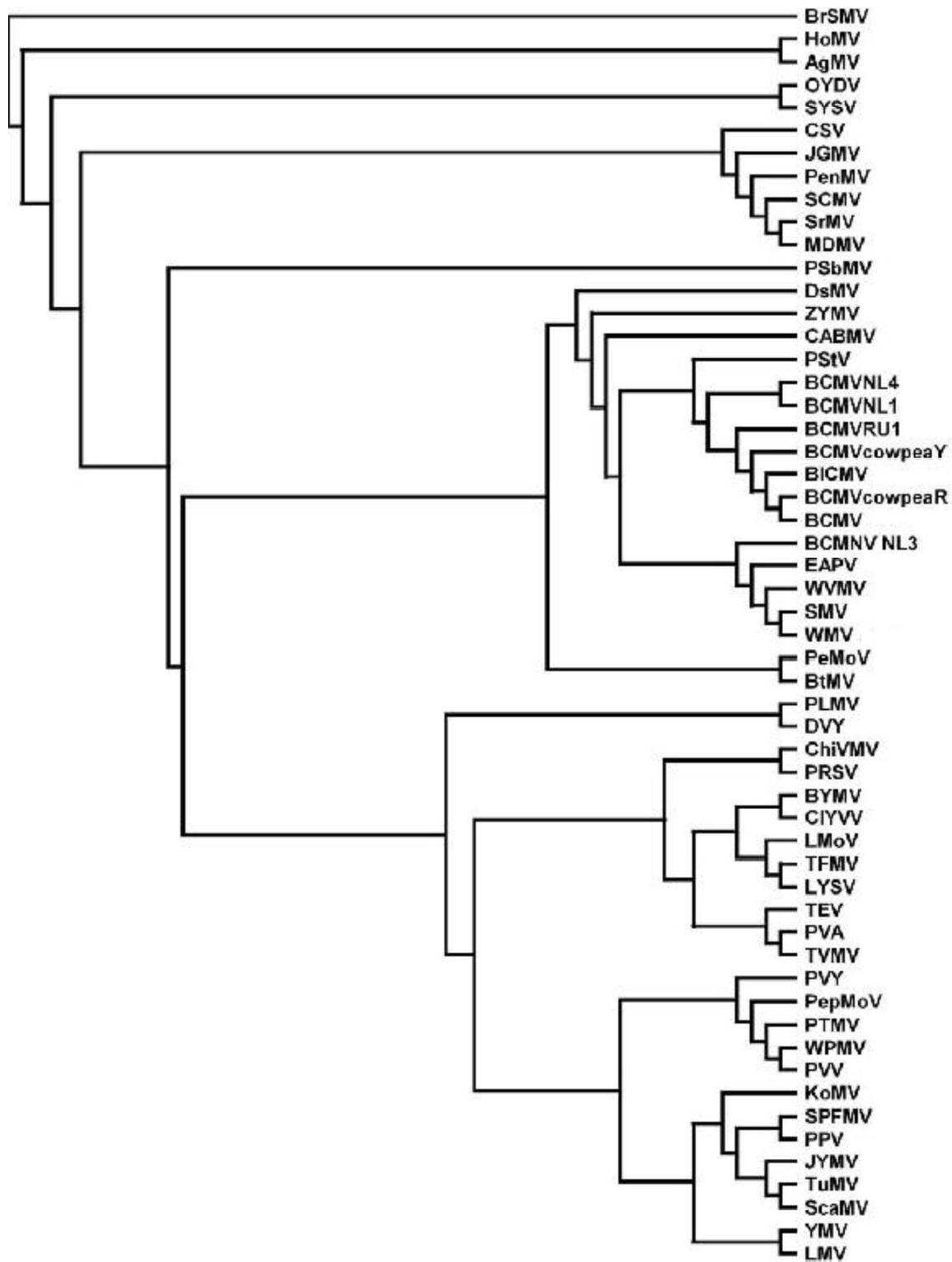
The viruses which showed the highest percentage of nucleotide identities and amino acid similarity with BCMV-NL4 were: BCMV-NL1 (86nt, 92aa), BCMV cowpea isolate Y (85, 91), BCMV cowpea isolate R (84, 88), BCMV-BICMV (84, 88), BCMV-RU1 (82, 88) and BCMV-PStV (82, 87). The percentages of identity with the genomic sequences of

the other selected viruses ranged from 6 to 69% (table 3). The percentages of similarity with the polyproteins of the other selected viruses ranged from 19 to 71% (table 3). The lowest scores were obtained for the polyproteins of viruses belonging to different genera of viruses in the *Potyviridae*. Among species of the genus *Potyvirus*, amino acid sequence similarities with the polyprotein of BCMV-NL4 ranged from 39 to 71% (Table 3). These results fit well the criteria for differentiation of species in the different genera of the *Potyviridae*: <76% nucleotide identity and <82% amino acid sequence identity of the ORF<sup>1</sup>. The lowest scores of amino acid sequence similarity were with HoMV (38%) and AgMV (37%) of the genus *Rymovirus* and with BrSMV (19%) of the genus *Tritimovirus*.

A cladogram constructed based on multiple sequence alignments of the polyproteins of BCMV-NL4 and 54 other viruses using the Neighbour-Joining method<sup>25</sup> with BrSMV as the outgroup, showed that BCMV-NL4 is most closely related to BCMV-NL1, and was clustered with the other strains and isolates of BCMV into a broader group of potyviruses infecting legumes and other dicotyledons plants (Figure 3). Other clusters included viruses infecting monocotyledons plants, i.e. the *Sugarcane mosaic virus*<sup>22</sup>, the cluster of AgMV and HoMV of genus *Rymovirus*, the cluster of viruses OYDV and SYSV, and the cluster of potyviruses infecting solanaceous plants: PTV, PVV, WPMV, PVY, PepMoV and PVA.

Sequences of the coat protein and the 3' UTR have been considered a valuable taxonomic indicator for determination of genetic relatedness and to discriminate among species and strains of potyviruses<sup>2, 11</sup>. Several viruses, for which there is not complete sequence information, were included in the analysis of the CP and UTR regions. The comparison of BCMV-NL4 coat protein sequence with corresponding sequences of other potyviruses from GenBank using blastp, showed 100% identity with the Mexican variant (L11890) and 99% with the NL4 isolate (L21766), reported by Wyatt and Berger in 1993. Analyses of the 3' UTR with blastn showed 100% identity with the Mexican variant, 98% with the Florida strain (US5) (L19473) and 95% with the NL4 isolate (L21766),

When a multiple sequence alignment was performed using CP sequences of BCMV-NL4 and other strains and isolates of BCMV, higher CP amino acid identities were found between the BCMV-NL4 strain selected for this investigation, and: the Mexican (US6) variant (100%), BCMV-NL4 [L21766] (99%), BCMV-US5 (98%) and BCMV-



**Figure 3.** Cladogram resulting from multiple sequence alignments of polyproteins of BCMV-NL4 and 54 other viruses of the family *Potyviridae* reported to GenBank. The tree was constructed using the Neighbour-Joining method and viewed with the TreeView program. Sequences used are detailed in the text.

**Table 3.** Scores of nucleotide identity and amino acid similarity sequences of BCMV-NL4 with other viruses of the family *Potyviridae* calculated using the CLUSTALW multiple sequence alignment program.

Virus	Scores of nucleotide sequences	Scores of amino acid sequences	Virus	Scores of nucleotide sequences	Scores of amino acid sequences
BCMV-NL1	86	92	TVMV	49	44
BCMVcowpeaY	85	91	TuMV	48	44
BCMVcowpeaR	84	88	JYMV	47	44
BCMV	84	88	LMoV	47	44
BCMV-RU1	82	88	PenMV	49	43
BICMV	84	88	ChiVMV	48	43
PStV	82	87	PepMoV	47	43
WMV	69	71	SCMV	48	43
SMV	66	69	MDMV	48	43
BCMNV	66	68	PVY	47	43
WVMV	64	68	PTV	46	43
EAPV	67	67	WPMV	46	43
CABMV	63	66	PVV	46	43
ZYMV	59	61	TFMV	47	43
DsMV	56	59	DVY	47	43
PeMoV	53	50	SrMV	49	42
BtMV	53	50	LMV	46	42
YMV	49	46	LYSV	46	42
SPFMV	48	45	JGMV	47	41
PPV	48	45	PRSV	46	41
TEV	50	45	PSbMV	46	41
ScaMV	50	45	CSV	46	41
CIYVV	48	45	SYSV	34	40
PLMV	46	45	OYDV	34	39
KMV	48	45	HoMV	36	38
BYMV	49	44	AgMV	36	37
PVA	49	44	BrSMV	6	19

NL7 (96%). Similar results were obtained when their 3'UTRs were compared: BCMV-NL4 showed higher identity (95%) with the Mexican variant, BCMV-US5 (93%), BCMV-NL7 (89%) and BCMV-NL4 [L211766] (88%) (Table 4 and Figure 4).

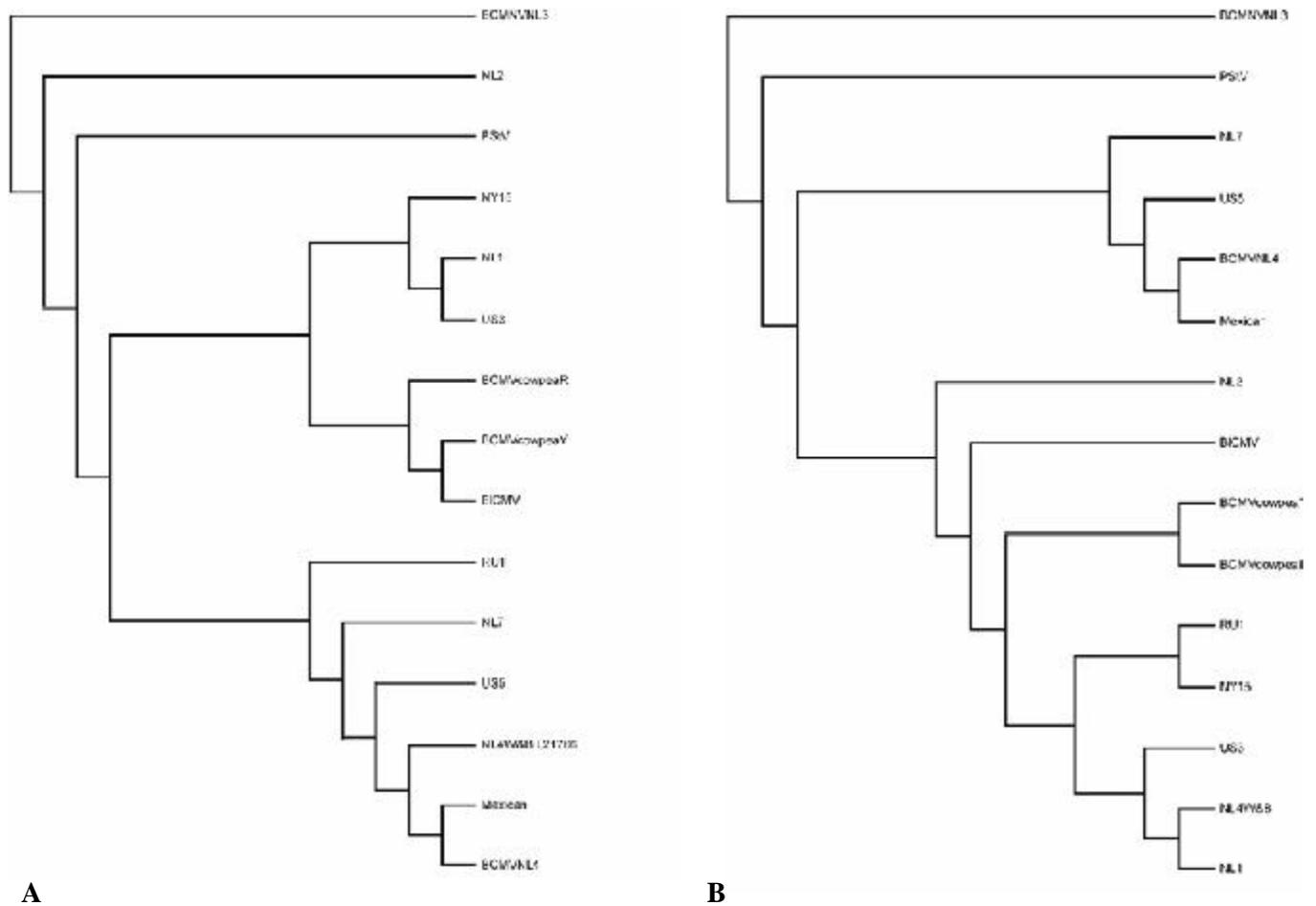
The results obtained in this investigation closely agree with the biological properties of the known BCMV strains originally described by Drijfhout<sup>10</sup>, particularly the high degree of nucleotide and amino acid sequence identity found between the Great Northern (NL4) and Mexican (US6) isolates representing pathogroup VII of BCMV. These two isolates can be considered as variants of a recognized strain of BCMV known as US6 in the United States, and

NL4 in Europe. This BCMV strain is particularly important due to its pathogenicity gene P2<sup>2</sup>, which attacks the recessive gene *bc 2*<sup>2</sup>, widely used in common bean improvement projects to protect the dominant necrosis gene (*I*) from necrosis-inducing strains of BCMV and BCMNV. The *bc 2*<sup>2</sup> gene is also present in many common bean cultivars (devoid of the *I* gene), derived from the original Great Northern and Red Mexican common bean genotypes<sup>5</sup>.

The close relationship observed in this study between BCMV-NL4 and BCMV-NL1 was expected, considering that BCMV-NL1 is the Type strain of BCMV, and the only strain of the original seven BCMV strains from common bean described by Drijfhout<sup>10</sup> that had

**Table 4.** Similarity scores of 3'UTR nucleotide sequences and coat protein amino acidic sequences of BCMV-NL4 with sequences of the genomic 3' end from strains of BCMV and BCMNV, using the CLUSTALW multiple sequence alignment program.

Strain / accession number	Pathogenicity group	3'UTR	Coat protein
Mexican / L11890	VII	95	100
NL4 / L21766	VII	88	99
US5 / L19473	IVa	93	98
NL7 / U37075	II	89	96
RU1 / U37077		86	95
NY15 / AF083559	Va	87	91
NL1 / AY112735	I	87	90
NL2 / L19472	Vb	88	90
BCMVcowpeaR / AJ312437		86	90
BCMVcowpeaY / AJ3122438		86	90
PStV / AY968604		84	90
BICMV / AY575773		87	90
US3 / U37073	IVb	85	89
BCMNV-NL3 / NC_004047	VIa	64	77



**Figure 4.** Cladograms resulting from multiple sequence alignments of coat proteins (A) and 3'UTR (B) sequences of BCMV-NL4 and other strains of the BCMV reported to GenBank, using BCMNV-NL3 as an outgroup. The trees were constructed using the Neighbour-Joining method and viewed with the TreeView program. Sequences used are indicated in the table 4.

been completely sequenced. The remaining fully-sequenced BCMV strains compared here with BCMV-NL4, are legume BCMV strains isolated from *Vigna* spp. (with the exception of BCMV-RU1), which formed a close but separate group of BCMV strains, referred to as the “blackeye cowpea mosaic virus strain subgroup”<sup>28</sup>. The high (>95%) CP and 3' UTR sequence identities observed between BCMV-NL4 and the Florida strain of BCMV, demonstrate that BCMV-NL4 belongs to the common bean subgroup of BCMV strains<sup>3</sup>.

Finally, the close relationship observed between the BCMV-NL4 strain selected for this investigation and the Mexican (US6) variant, suggests that this is the origin of the BCMV-NL4 strain maintained at CIAT and characterized here. Nevertheless, considering that the BCMV-NL4 strain was described before the US6 variant, we propose that BCMV-NL4 should be the representative strain of the pathogenic group VII, indicating the variant [Great Northern or Mexican] whenever required.

#### Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Ana K. Martínez and Ivan Lozano of the Virology Research Unit and Dr. Joseph Tohme, Dr. Gerardo Gallego and Luisa F. Fory of the Biotechnology Research Unit of CIAT for their assistance. We also thank Dr. Javier Romero and workers of Laboratory of Plant Virology at INIA for their collaboration.

#### References

1. **Adams MJ, Antoniw JF, Fauquet CM.** 2005. Molecular criteria for genus and species discrimination within the family *Potyviridae*. *Arch Virol* **150**: 459-479.
2. **Atreya CD.** 1992. Application of genome sequence information in potyvirus taxonomy: an overview. *Arch Virol Suppl* **5**: 17-23.
3. **Berger PH, Wyatt SD, Shiel PJ, Silbernagel MJ, Druffel MJ, Mink GI.** 1997. Phylogenetic analysis of the Potyviridae with emphasis on legume-infecting potyviruses. *Arch Virol* **142**:1979-1999.
4. **Chen J, Adams MJ, Zheng HY, Chen JP.** 2003. Sequence analysis demonstrates that *Onion yellow dwarf virus* isolates from China contain a P3 region much larger than other potyviruses. *Arch Virol* **148**: 1165-1173.
5. CIAT-CABI. 1991. Common Beans: Research for Crop Improvement. (A.v. Schoonhoven and O. Voysest, Eds.). Redwood Press, Melksham, U.K. 980 p.
6. **Domier LL, Shaw JG, Rhoads RE.** 1987. Potyviral proteins share amino acid sequence homology with picorna-, como-, and caulimoviral proteins. *Virology* **158**: 20-27.
7. **Dougherty WG, Carrington JC.** 1988. Expression and function of potyviral gene products. *Annu Rev Phytopathol* **26**: 123-143.
8. **Dougherty WG, Parks TD, Cary SM, Bazan JF, Fletterick RJ.** 1989. Characterisation of the catalytic residues of the tobacco etch virus 49-kDa proteinase. *Virology* **172**: 302-310.
9. **Dreher TW, Miller WA.** 2006. Translational control of positive strand RNA plant viruses. *Virology* **344**: 185-197.
10. **Drijfhout E.** 1978. Genetic interactions between *Phaseolus vulgaris* and bean common mosaic virus with implications for strain identification and breeding for resistance. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Wageningen. 98 p.
11. **Frenkel MJ, Ward CW, Shukla DD.** 1989. The use of 3 noncoding nucleotide sequences in the taxonomy of potyviruses: Application to watermelon mosaic virus 2 and soybean mosaic virus-N. *J Gen Virol* **70**: 2775-2783.
12. **Gal-On A.** 2000. A point mutation in the FRNK motif of the potyvirus helper component-protease gene alters symptoms expression in cucurbits and elicits protection against the severe homologous virus. *Phytopathology* **90**: 467-473.
13. **Kong P, Steinbiss HH.** 1998. Complete nucleotide sequence and analysis of the putative polyprotein of maize dwarf mosaic virus genomic RNA (Bulgarian isolate). *Arch Virol* **143** (9): 1791-1799.
14. **Lain S, Riechmann JL, García JA.** 1989. The complete nucleotide sequence of plum pox potyvirus RNA. *Virus Res* **13** (2): 157-172.
15. **Levy S, Avni D, Hariharan N, Perry RP, Meyuhas O.** 1991. Oligopyrimidine tract at the 5' end of mammalian ribosomal protein mRNAs is required for their translational control. *Proc Natl Acad Sci USA* **88**: 3319-3323.
16. **Mlotshwa S, Verver J, Sithole-Niang I, Van Kampen T, Van Kammen A, Wellink J.** 2002. The genomic sequence of Cowpea aphid-borne mosaic virus and its similarities with other potyviruses. *Arch Virol* **147**: 1043-1052.
17. **Morales FJ.** 1979. Purification and serology of bean common mosaic virus. *Turrialba* **29**: 320-323.
18. **Morales FJ.** 1980. El mosaico común del frijol. Metodología de investigación y técnicas de control. CIAT. 22 p.
19. **Plisson C, Drucker M, Blanc S, German-Retana S, Le Gall O, Thomas D, Bron P.** 2003. Structural characterization of HC-Pro, a plant virus multifunctional protein. *J Biol Chem* **278**: 23753-23761.
20. **Riechmann JL, Lain S, Garcia JA.** 1992. Highlights and prospects of potyvirus molecular biology. *J Gen Virol* **73**: 1-16.
21. **Robaglia C, Durand-Tardif M, Tronchet M, Boudazin G, Astier-Manificier S, Casse-Delbart F** 1989. Nucleotide sequence of potato virus Y (N Strain) genomic RNA. *J Gen Virol* **70**: 935-947.
22. **Shukla DD, Frenkel MJ, McKern NM, Ward CW, Jilka J, Tosic M, Ford RE.** 1992. Present status of the sugarcane mosaic subgroup of potyviruses. *Arch Virol Suppl* **5**: 363-373.

23. **Silbernagel MJ.** 1969. Mexican strain of bean common mosaic virus. *Phytopathology* **59**: 1809-1812.
24. **Spetz C, Valkonen JPT.** 2003. Genomic sequence of Wild potato mosaic virus as compared to the genomes of other potyviruses. *Arch Virol* **148**: 373-380.
25. **Thompson JD, Higgins DG, Gibson TJ.** 1994. CLUSTAL W: Improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids Res* **22**: 4673-4680.
26. **Turpen T.** 1989. Molecular cloning of a potato virus Y genome: nucleotide sequence homology in non-coding regions of potyviruses. *J Gen Virol* **70**: 1951-1960.
27. **Urcuqui-Inchima S, Haenni AL, Bernardi F.** 2001. Potyvirus proteins: a wealth of functions. *Virus Res* **74**: 157-175.
28. **Zheng H, Chen J, Chen J, Adams MJ, Hou M.** 2002. Bean common mosaic virus isolates causing different symptoms in asparagus bean in China differ greatly in the 5'-parts of their genomes. *Arch Virol* **147**: 1257-1262.

Recibido: febrero 22 de 2008

Aceptado para su publicación: mayo 6 de 2008

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

Por

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

## Resumen

**Arenas Díaz, G., H. Lamos Díaz & E. J. Villamizar Roa:** Comportamiento en el infinito de las soluciones de una clase abstracta de ecuaciones de evolución. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **32**(122): 47-59, 2008. ISSN 0370-3908.

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

**Palabras clave:** atractor global, comportamiento en el infinito de ecuaciones de evolución, condiciones de Carathéodory.

## Abstract

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

---

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

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

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

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

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

## 1. Problema abstracto

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

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

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

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

El dominio del operador  $A$  es dado por

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2. Soluciones débiles

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- i) Existen  $\varphi(a+0) = \lim_{t \rightarrow a^+} \varphi(t)$ ,  $\varphi(b-0) = \lim_{t \rightarrow b^-} \varphi(t)$ .
- ii) Si  $(b, \varphi(b+0)) \in \Omega$  entonces  $\varphi$  puede ser prolongada en  $(a, b + \delta]$  para algún  $\delta > 0$ . Análogamente para el punto  $a$ .
- iii)  $\varphi(t)$  puede ser prolongada en un intervalo  $(\gamma, \omega)$  tal que

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$|G(t, \mathbf{g})| \leq c_B + |\langle \mathbf{f}_1(t), \mathbf{w}_i \rangle| + |\langle \mathbf{f}_2(t), \mathbf{w}_i \rangle| = m_i(t)$ ,  $\forall (t, \mathbf{g}) \in D$ , siendo cada  $m_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, k$ , integrable en  $[0, T]$ . Así, por el Teorema de Carathéodory, existe una solución  $\mathbf{u}^k(t)$  definida en  $[0, T_k]$ ,  $0 < T_k \leq T$ . Como veremos abajo, para cualquier intervalo  $I$  donde  $\mathbf{u}^k(t)$  está definida, tenemos que

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

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

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

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

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

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

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

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

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

y

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

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

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

entonces, de (12) encontramos

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

y así

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

En particular, tenemos que

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

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

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

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

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

Consecuentemente, la desigualdad de Gronwall implica que

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{soporte de } \phi \subset M\}$$

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

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

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

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

$$(22)$$

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

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

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

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

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

De (23) tenemos que

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

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

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

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

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

De (24) deducimos que

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

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

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

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

y usando (25), obtenemos

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

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

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

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

como queríamos demostrar.

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

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

Integrando de 0 a  $T$ , obtenemos

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

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

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

Ahora mostraremos que cuando  $k \rightarrow \infty$

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

De hecho,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} |(B(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \mathbf{w})| & \leq c|\mathbf{u}|^{1/2}|\mathbf{u}|^{1/2}|\mathbf{v}|^{1/2}|\mathbf{v}|^{1/2}|\mathbf{w}| \quad (29) \\ |(B_2(\mathbf{u}), \mathbf{v})| & \leq c|\mathbf{u}|^{1/2}|\mathbf{u}|^{1/2}|\mathbf{v}|^{1/2}|\mathbf{v}|^{1/2}, \quad (30) \end{aligned}$$

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

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

$$\mathbf{w}_t + A\mathbf{w} = -B_1(\mathbf{w}) - B_2(\mathbf{w}) - B(\mathbf{u}, \mathbf{w}) - B(\mathbf{v}, \mathbf{w}),$$

$$\mathbf{w}(0) = 0.$$

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

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

$$= -(B_2\mathbf{w}, \mathbf{w}) - (B(\mathbf{w}, \mathbf{v}), \mathbf{w}).$$

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

$$|(B_2\mathbf{w}, \mathbf{w})| \leq c|\mathbf{w}|\|\mathbf{w}\| \leq c_\eta|\mathbf{w}|^2 + \eta\|\mathbf{w}\|^2,$$

$$|(B(\mathbf{w}, \mathbf{v}), \mathbf{w})| = |(B(\mathbf{w}, \mathbf{w}), \mathbf{v})| \leq c|\mathbf{w}|\|\mathbf{w}\|\|\mathbf{v}\|$$

$$\leq c_\eta\|\mathbf{v}\|^2|\mathbf{w}|^2 + \eta\|\mathbf{w}\|^2.$$

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

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

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

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

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

### 3. Convergencia para las soluciones estacionarias

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{d}{dt} |\mathbf{w}|^2 + \|\mathbf{w}\|^2 = B(\mathbf{w}, \mathbf{u}_\infty, \mathbf{w}) - (B_2\mathbf{w}, \mathbf{w})$$

$$\leq \|\mathbf{w}\|^2 (\|B\|_1 \|\mathbf{u}_\infty\| + \|B_2\|_1).$$

Por (32) obtenemos

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

La desigualdad de Gronwall implica que

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

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

Esto significa que si  $B_2$  satisface

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

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

Con esto hemos probado el siguiente teorema.

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

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

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

### 4. Atractor global

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

de donde,

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

para todo  $t \geq 0$ , y así,

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Por lo tanto,

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

o equivalentemente,

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

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

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

Por el Lema de Gronwall, encontramos

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

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

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

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

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

### 5. Aplicaciones

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

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

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

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

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

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

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

Introducimos ahora los siguientes operadores:

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

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

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

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

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

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

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

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

Observemos que

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

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

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

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

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

Ahora, por la desigualdad de Poincaré

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

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

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

Consecuentemente,

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

Similarmente,

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

De (42) y (43) obtenemos

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

para el problema (44) la ecuación abstracta

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Referencias

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

Recibido el 19 de marzo de 2007

Aceptado para su publicación el 21 de diciembre de 2007

# FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN PARA LA N-ÉSIMA PARTÍCULA MÁS PRÓXIMA EN UNA COLECCIÓN AL AZAR

Por

Cacier Z. Hadad & Franklin Ferraro G.<sup>1</sup>

## Resumen

**Hadad, C.Z., & F. Ferraro-G.**: Función de distribución para la n-ésima partícula más próxima en una colección al azar. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **32**(122): 61-66, 2008. ISSN 0370-3908.

Para hallar expresiones o encontrar valores numéricos para algunas propiedades físicas y fisicoquímicas en sistemas en que las partículas se distribuyen totalmente al azar (o que pueden considerarse, con buen grado de aproximación, como si lo estuvieran) en algunas ocasiones es necesario disponer de las funciones de distribución de las n-ésimas partículas más próximas a alguna partícula genérica. Sin embargo, a nuestro conocimiento, no existe una fórmula generatriz que permita obtenerlas y sólo se dispone de expresiones particulares para las 4 primeras funciones, dos de las cuales se encuentran reportadas con errores. En este trabajo se deduce tal fórmula generatriz, se indica la manera de usarla, y, a modo de ejemplo, se listan y grafican las funciones particulares hasta el quinto orden.

**Palabras clave:** función de distribución radial, fórmula “generatriz”, n-ésima partícula más cercana, distribución al azar.

## Abstract

In order to find expressions or to find numerical values for some physical or physicochemical properties in systems in which particles are distributed totally at random (or that can be considered, in good approximation, as if they were) sometimes it is necessary to have distribution functions for the nth-nearest-neighbour particle around some generic one. To our knowledge, a general formula does not exist which allows obtain them. There are specific expressions reported for only the four first functions, a couple of which with some mistakes. In this paper such a general formula is derived, it is indicated how to use it, and the particular first five functions are listed, including their plots.

**Key words:** radial distribution function, “generatrix” formula, nth-nearest-neighbour particle, random distribution.

<sup>1</sup> Grupo de Química-Física Teórica, Instituto de Química, Universidad de Antioquia. Calle 67 N° 53-108, bloque 2 oficina 337 - Apartado Aéreo 1226, Medellín, Colombia. E-mail: czhadad@matematicas.udea.edu.co

## Introducción

Conocer la función de distribución espacial de partículas de algún sistema es fundamental para la resolución de algunos problemas físicos y fisicoquímicos en diferentes áreas del conocimiento (S. Chandrasekhar, 1943; Hadad *et al.*, 2003; Inokuti *et al.*, 1965; Tewari *et al.* 2006; Tonooka *et al.*, 1997). Particularmente, existen varios sistemas en que las partículas se distribuyen totalmente al azar o pueden considerarse con buen grado de aproximación, como si lo estuvieran. (Tonooka *et al.*, 1997; A. Tewari & A. M. Gokhale, 2006; M. Inokuti & F. Hirayama, 1965; C. Z. Hadad, 2007) Consecuentemente, es muy importante disponer de alguna fórmula generatriz para obtener las funciones de distribución de las  $n$ -ésimas partículas más próximas a alguna partícula en una colección al azar. Sin embargo, a nuestro conocimiento no existe tal fórmula general y sólo se dispone de expresiones particulares para las 4 primeras funciones (S. Chandrasekhar, 1943; K. Tonooka *et al.*, 1997).

Fue Chandrasekhar quién primero mostró en 1943 (S. Chandrasekhar, 1943) para un problema de astrofísica, que la función de distribución radial para el primer vecino más cercano en una colección de partículas ubicadas al azar es:

$$F_1(r) = 4\pi cr^2 \exp(-4\pi cr^3/3) \quad (1),$$

en donde  $c$  es la densidad de partículas.

Por otro lado, Tonooka *et al.* (Tonooka *et al.*, 1997) trabajando en un modelo estadístico para la luminiscencia en sólidos amorfos, en que los centros ópticos pueden considerarse como distribuidos de manera aleatoria, dedujo las funciones de distribución para los 2<sup>os</sup>, 3<sup>os</sup>, 4<sup>os</sup> vecinos más próximos. Sin embargo, aunque las gráficas de las funciones mostradas por el autor parecen ser correctas, las expresiones matemáticas reportadas contienen errores en las 3<sup>as</sup> y 4<sup>as</sup> funciones.

En este trabajo se deduce una fórmula de recurrencia para encontrar la función de distribución de la  $n$ -ésima partícula más próxima a alguna partícula en una colección al azar, en términos de la función inmediatamente anterior. Además se indica la manera de usarla, y, a modo de ejemplo, se obtienen las funciones,  $F_n(r)$ , para  $n = 2, 3, 4$  y 5, corrigiendo con ello  $F_3(r)$  y  $F_4(r)$  listadas por Tonooka *et al.* (Tonooka *et al.*, 1997).

## Fórmula generatriz

En una distribución aleatoria de partículas en el espacio, la probabilidad de que la  $n$ -ésima partícula más próxima a una partícula esté ubicada entre  $r$  y  $r + dr$ ,  $F_n(r)dr$ , es igual a la probabilidad de que no se encuentre entre 0 y

$r$ ,  $1 - \int_0^r F_n(r_n)dr_n$ , multiplicada por la probabilidad de

encontrar cualquier partícula en la capa esférica entre  $r$  y  $r + dr$ ,  $F(r)dr$ , y, además, en los casos  $n \geq 2$ , multiplicada por las probabilidades de encontrar a los  $(n-1)$ ,  $(n-2)$ , ..., 1 -ésimas partículas más cercanas

entre 0 y  $r$ ,  $\int_0^r F_{n-1}(r_{n-1})dr_{n-1}$ ,  $\int_0^r F_{n-2}(r_{n-2})dr_{n-2}$ , ...

$\int_0^r F_1(r_1)dr_1$ , respectivamente. De esto se sigue que:

$$F_n(r) = \left(1 - \int_0^r F_n(r_n)dr_n\right) \left(\int_0^r F_{n-1}(r_{n-1})dr_{n-1}\right) \cdots \left(\int_0^r F_1(r_1)dr_1\right) F(r), \quad (2)$$

En donde, de acuerdo a Chandrasekhar (S. Chandrasekhar, 1943):

$$F(r) = 4\pi cr^2, \quad (3)$$

Con  $c$ , concentración de partículas, como en (1).

De la expresión (2) se deduce:

$$-d \ln \left(1 - \int_0^r F_n(r_n)dr_n\right) = \left(\int_0^r F_{n-1}(r_{n-1})dr_{n-1}\right) \cdots \left(\int_0^r F_1(r_1)dr_1\right) F(r)dr$$

Integrando esta última expresión entre 0 y  $r$  y aplicando la exponencial, se llega a:

$$1 - \int_0^r F_n(r_n)dr_n = \exp \left[ - \int_0^r \left( \int_0^{r_{n-1}} F_{n-1}(r_{n-1})dr_{n-1} \right) \cdots \left( \int_0^{r_1} F_1(r_1)dr_1 \right) F(r)dr \right]$$

Introduciendo este resultado en (2) tenemos:

$$F_n(r) = \exp \left[ - \int_0^r \left( \int_0^r F_{n-1}(r_{n-1}) dr_{n-1} \right) \cdots \left( \int_0^r F_1(r_1) dr_1 \right) F(r) dr \right] \\ \times \left( \int_0^r F_{n-1}(r_{n-1}) dr_{n-1} \right) \cdots \left( \int_0^r F_1(r_1) dr_1 \right) F(r), \quad (4)$$

Desde la forma (2) aplicada a  $F_{n-1}(r)$ , se deduce para  $\int_0^r F_{n-1}(r_{n-1}) dr_{n-1}$ :

$$\int_0^r F_{n-1}(r_{n-1}) dr_{n-1} = \frac{\left( \int_0^r F_{n-2}(r_{n-2}) dr_{n-2} \right) \cdots \left( \int_0^r F_1(r_1) dr_1 \right) F(r) - F_{n-1}(r_{n-1})}{\left( \int_0^r F_{n-2}(r_{n-2}) dr_{n-2} \right) \cdots \left( \int_0^r F_1(r_1) dr_1 \right) F(r)}$$

Reemplazando esta última expresión en el exponente de (4) y reordenando,  $F_n(r)$ , queda:

$$F_n(r) = \int_0^r F_{n-1}(r_{n-1}) dr_{n-1} \exp \left[ \int_0^r F_{n-1}(r_{n-1}) dr_{n-1} \right] \\ \times \left\{ \exp \left[ - \int_0^r \left( \int_0^r F_{n-2}(r_{n-2}) dr_{n-2} \right) \cdots \left( \int_0^r F_1(r_1) dr_1 \right) F(r) dr \right] \right. \\ \left. \times \left( \int_0^r F_{n-2}(r_{n-2}) dr_{n-2} \cdots \int_0^r F_1(r_1) dr_1 F(r) \right) \right\}$$

De acuerdo a (4), la parte encerrada entre llaves en esta última expresión corresponde a  $F_{n-1}(r)$ , por lo tanto, la fórmula de recurrencia buscada es:

$$F_n(r) = F_{n-1}(r) \int_0^r F_{n-1}(r_{n-1}) dr_{n-1} \exp \left( \int_0^r F_{n-1}(r_{n-1}) dr_{n-1} \right), \quad n \geq 2, \quad (5)$$

Nótese que para  $n = 1$ , la fórmula generatriz se alcanza tempranamente desde (4):

$$F_1(r) = F(r) \exp \left( - \int_0^r F(r) dr \right), \quad (6)$$

### Modo de aplicación

A modo de ejemplo, calculemos  $F_n(r)$  para  $n = 2, 3, 4$  y  $5$ . La fórmula de recurrencia (5) debe emplearse en conjunto con la definición de  $F_n(r)$  (ecuación 2), pero aplicada a  $F_{n-1}(r)$ . Así, en el cálculo de  $F_2(r)$  debemos obtener

previamente  $\int_0^r F_1(r_1) dr_1$ , utilizando la ecuación (2) para  $F_1$ :

$$\int_0^r F_1(r_1) dr_1 = \left(1 - \frac{F_1(r)}{F(r)}\right) = \frac{F(r) - F_1(r)}{F(r)} = 1 - \exp(-4\pi cr^3/3), \quad (7)$$

en donde se ha empleado (1) y (3). Introduciendo este resultado y la expresión (1) en la ecuación (5) para  $n = 2$ , obtenemos:

$$F_2(r) = 4\pi cr^2 \exp(-4\pi cr^3/3) \left[1 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right] \exp\left[1 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right], \quad (8)$$

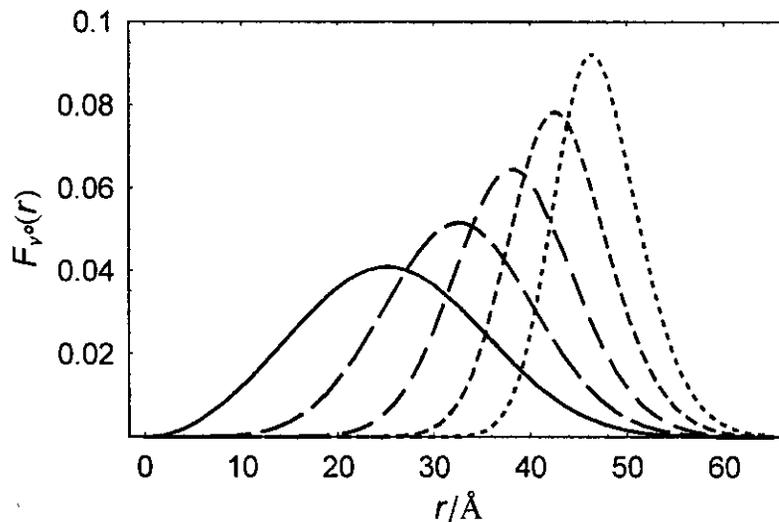
Por medio de este camino es posible deducir fácilmente las restantes funciones. Las fórmulas extendidas para las siguientes tres son las siguientes:

$$F_3(r) = 4\pi cr^2 \left\{1 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right\} \left\{1 - \exp\left[1 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right]\right\} \\ \times \exp\left[2 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right)\right], \quad (9)$$

$$F_4(r) = 4\pi cr^2 \left\{1 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right\} \left\{1 - \exp\left[1 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right]\right\} \\ \times \left\{1 - \exp\left[2 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right)\right]\right\} \\ \times \exp\left[3 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right)\right] \\ \times \exp\left[-\exp\left(2 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp(-4\pi cr^3/3)\right)\right], \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
F_5(r) = & 4\pi cr^2 \left\{ 1 - \exp\left[-4\pi cr^3/3\right] \right\} \left\{ 1 - \exp\left[1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right] \right\} \\
& \times \left\{ 1 - \exp\left[2 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right)\right] \right\} \\
& \times \left\{ 1 - \exp\left[3 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right)\right] \right\} \\
& \times \exp\left[-\exp\left(2 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right)\right)\right] \\
& \times \exp\left[4 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right)\right] \\
& \times \exp\left[-\exp\left(2 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right)\right)\right] \\
& \times \exp\left[-\exp\left(3 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right)\right)\right] \\
& \times \exp\left[-\exp\left(-\exp\left(2 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right) - \exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right)\right)\right)\right] \\
& \times \exp\left[-\exp\left(1 - 4\pi cr^3/3 - \exp\left(-4\pi cr^3/3\right)\right)\right], \quad (11).
\end{aligned}$$

En la figura 1 se muestran las gráficas de estas funciones. Las expresiones (9) y (10) corrigen las fórmulas reportadas en el apéndice A del artículo de Tonooka *et al* (Tonooka *et al.* 1997).



**Figura 1.** Diagrama para las primeras 5 funciones de distribución, con  $c = 10^5$  partículas/Å<sup>3</sup> en las expresiones (1), (8)-(11). La curva sólida es para  $F_1(r)$ , mientras que las curvas de segmentos corresponden a las restantes funciones, en dónde se disminuye el grosor del segmento a medida que se avanza en la secuencia  $\nu = 2, 3, 4, 5$  de  $F_\nu(r)$ .

## Conclusiones

Este trabajo demostró que es factible disponer de una fórmula generatriz de recurrencia para obtener las funciones de distribución de las  $n$ -ésimas partículas más próximas a alguna partícula genérica y que dicha fórmula es fácil de utilizar. Además, una mirada de las funciones (8)-(11) permite ver que su extensión y grado de complejidad aumenta con el orden de la función, lo cual indica que es conveniente disponer de la fórmula generatriz nombrada. Por otro lado, la explicitación de la tercera y cuarta función permite demostrar, al compararla con las expresiones listadas por Tonooka *et al* (Tonooka *et al.*, 1997), que efectivamente estas últimas contienen errores en algunos de sus términos.

## Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Antioquia, Colombia. CZH agradece a CONICYT y a FONDECYT de Chile.

## Referencias

- 1 Chandrasekhar, S. 1943. Stochastic problems in physics and astronomy. *Rev. Mod. Phys.* **15**: 86-87.
- 2 Tonooka, K. Yamada, K., Kato, Y., Hayakawa, T. & Kamata, N. 1997. Theory of donor fluorescence governed by discrete energy transfers between rare-earth ions in glasses *J. Opt. Soc. Am. B.* **14**, 713-721.
- 3 Tewari, A. & Gokhale, A. M. 2006. Nearest-neighbor distributions in thin films, sheets, and plates. *Acta Mater.* **54**: 1957-1963.
- 4 Inokuti M. & Hirayama, F. 1965. Influence of energy transfer by the exchange mechanism on donor luminescence. *J. Chem. Phys.* **43**: 1978-1989.
- 5 Hadad, C. Z. & Vásquez, S. O. 2003. Statistical approach to the transient up-converted population in monodoped amorphous solids. *Chem. Phys.* **5**: 3027-3033.

Recibido: noviembre 3 de 2006

Aceptado para su publicación: marzo 7 de 2008

# ADSORCIÓN CATALÍTICA SIMULTÁNEA DE NO Y SO<sub>2</sub> SOBRE CARBONES ACTIVADOS

Por

Diana López<sup>1</sup>, Robison Buitrago<sup>2</sup> & Fanor Mondragón<sup>3</sup>

## Resumen

**López, D., R. Buitrago & F. Mondragón:** Adsorción catalítica simultánea de NO y SO<sub>2</sub> sobre carbones activados. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(122): 67-78, 2008. ISSN 0370-3908.

Los carbones activados proporcionan una alternativa apropiada para la adsorción simultánea de NO y SO<sub>2</sub> con el fin de controlar las emisiones de baja concentración de estos gases contaminantes. La adsorción de NO y SO<sub>2</sub> a 30°C sobre carbones activados se estudió por espectrometría de masas y quimioluminiscencia, además se estudiaron los complejos superficiales formados durante la adsorción de NO y SO<sub>2</sub> por espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) y desorción a temperatura programada (DTP), y el efecto de la adición de O<sub>2</sub> y la presencia de cobre como catalizador. El oxígeno presentó un efecto catalítico en la adsorción de estos gases. En la adsorción simultánea de NO y SO<sub>2</sub>, se presentó disminución de la adsorción de NO, mientras que la adsorción de SO<sub>2</sub> mejoró levemente. Para la reacción con la mezcla NO/SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> se presentó un efecto sinérgico incrementando la adsorción de ambos. La adición de cobre catalizó la transferencia de oxígeno a la matriz carbonosa.

**Palabras clave:** carbones activados, gases contaminantes, catalizador, adsorción.

## Abstract

Simultaneous adsorption of NO and SO<sub>2</sub> on activated carbon provides an adequate alternative to control the low concentration emissions of these air pollutants. The adsorption of NO and SO<sub>2</sub> at 30°C was followed by a quadrupole mass spectrometer and a NO<sub>x</sub> chemiluminescence analyzer and the surface complexes formed during the adsorption were studied by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and temperature programmed desorption (TPD). The effect of the addition of copper supported on the carbon and O<sub>2</sub> on the gas stream were studied. The oxygen presented a catalytic effect on the adsorption of these gases. In the simultaneous adsorption of NO and SO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> inhibited the adsorption of NO, while SO<sub>2</sub> adsorption was notably improved. The reaction carried out under a NO/SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> gas mixture showed a synergic effect by increasing the adsorption of both gases. The addition of copper catalyzed the oxygen transfer to the carbon matrix.

**Key words:** activated carbons, air pollutants, catalyst, adsorption.

<sup>1</sup> Universidad de Antioquia, Instituto de Química, A.A. 1226 Medellín. Correo electrónico: diana\_lopez@yahoo.com

<sup>2</sup> Universidad de Antioquia, Instituto de Química, A.A. 1226 Medellín. Correo electrónico: robinsonbuitrago@gmail.com

<sup>3</sup> Universidad de Antioquia, Instituto de Química, A.A. 1226 Medellín. Correo electrónico: fmondra@carios.udea.edu.co

## Introducción

Los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) son considerados como unos de los gases más tóxicos emitidos a la atmósfera durante el proceso de combustión de combustibles fósiles en los sectores de la industria y el transporte. En consecuencia, los efectos sobre el ambiente y las leyes que regulan las emisiones de contaminantes son cada vez más drásticas y exigen soluciones inmediatas que implican variaciones sustanciales de los procesos de combustión existentes, rediseño de equipos y aplicación de nuevas tecnologías que conduzcan a la disminución de contaminantes (Agency, 2006).

La eliminación de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  por adsorbentes proporciona una alternativa apropiada para controlar las emisiones de baja concentración de estos gases contaminantes. Varios adsorbentes potenciales han sido investigados, incluyendo óxidos de metales, metales soportados en alumina, zeolitas entre otros, pero estos presentan varios inconvenientes como desactivación a baja temperatura por formación de sulfatos, desaluminación por el vapor de agua y sinterización de algunos metales a altas temperaturas (Boardman *et al.*, 1993; Gilot *et al.*, 1997; Krijnsen, 2000; Kikuyama *et al.*, 2004).

Los materiales carbonosos han sido muy utilizados para los procesos de adsorción ya que posee un gran número de propiedades físico-químicas que lo hacen un material apto para su uso como adsorbente. Estas propiedades están asociadas con su capacidad para la adsorción, catálisis y/o reacción con gases contaminantes para su transformación a compuestos que incluso pueden ser aprovechados como materia prima en la industria química, poseen extensa área superficial y porosidad, y pueden actuar como adsorbente y/o soporte. Además el bajo costo que implica la obtención de materiales carbonosos es de gran interés para el uso de estos en procesos de control de contaminación ambiental.

Entre los materiales carbonosos está el carbón activado que es un material amorfo utilizado industrialmente como adsorbente por exhibir un alto grado de porosidad y una extensa área superficial. Este es obtenido por pirólisis y activación ya sea química o física de cualquier sustancia rica en carbono con el fin de generar materiales altamente porosos con una gran cantidad de sitios activos.

La adsorción sobre carbones activados es una de las metodologías que más se investiga, ya que además de ser regenerativa, permite eliminar la mayor parte de las impurezas encontradas en el efluente gaseoso como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , material particulado, mercurio, dioxinas, furanos, metales

pesados, compuestos orgánicos volátiles, y trazas de otros elementos (Lizzio *et al.*, 1996; Farrauto *et al.*, 1997). Adicionalmente, los carbones activados pueden ser usados como catalizadores y/o como soportes catalíticos (Radovic *et al.*, 1997; Tomita, 2001; Pârvulescu *et al.*, 2003) con el fin de promover la vida útil y la actividad de dichos sistemas minimizando su papel como reactivo, especialmente cuando hay presencia de oxígeno. Una forma de lograrlo es incorporando metales que tengan actividad catalítica con el fin de reducir las temperaturas de operación y al mismo tiempo minimizar las pérdidas por gasificación. Estudios previos han demostrado que cuando este material es usado como soporte catalítico las capacidades de adsorción aumentan considerablemente (Tomita, 2001; Pârvulescu *et al.*, 2003). En particular el cobre ha sido reportado como un buen catalizador para la adsorción tanto de  $\text{SO}_2$  como de  $\text{NO}_x$  en procesos individuales a bajas temperaturas, sobre los carbones activados sin cobre se han reportado muy bajas capacidades de adsorción (Zhang *et al.*, 1992; Zhang *et al.*, 1993; Tseng *et al.*, 2003).

Existe relativamente poca información disponible acerca de las interacciones entre  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  con los grupos funcionales de la superficie de un carbón activado y de las interacciones entre estos gases con los metales (García *et al.*, 2002; Tseng *et al.*, 2003; Tseng *et al.*, 2004), como también del diseño de un adsorbente capaz de adsorber simultáneamente estos gases. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue estudiar la adsorción simultánea a baja temperatura de  $\text{NO}$  y  $\text{SO}_2$  sobre un carbón activado, el efecto catalítico del cobre y el efecto de la adición de oxígeno en la corriente gaseosa.

## Sección experimental

**Preparación de las muestras.** El carbonizado de carbón fue preparado a partir de un carbón sub-bituminoso de la mina Amagá, usando un tamaño de partícula de 150  $\mu\text{m}$ . La muestra de carbón fue pirolizada a 900°C por 1 hora en nitrógeno y activada con vapor de agua a 850°C por 3 horas. Parte de la muestra de carbón inicial fue sometida a desmineralización ácida con el fin de eliminar la mayor cantidad posible de materia mineral. En este caso se hizo una modificación al procedimiento propuesto por Bishop y Ward (Bishop *et al.*, 1958) para carbones de bajo rango con un tratamiento ácido según la secuencia HCl-HF-HCl- $\text{HNO}_3$ . Luego la muestra fue pirolizada, activada e impregnada con cobre por el método de impregnación húmeda con una solución de  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  con una concentración apropiada para obtener un total de 10% de Cu impregnado en la matriz carbonosa.

Los experimentos de adsorción se realizaron en un reactor de lecho fijo en un horno vertical. Para cada ensayo se emplearon aproximadamente 1 g de muestra. La temperatura se registró mediante una termocupla insertada en una hendidura de la pared del tubo quedando embebida en el lecho de la muestra acoplada a un controlador de temperatura. Antes de iniciar el calentamiento, el sistema se purgó por 30 min en atmósfera de He con un flujo que se mantuvo en 100 mL/min, luego el horno se calentó a 15 °C/min hasta 500 °C y se dejó a esta temperatura por 30 min con el fin de limpiar parcialmente la muestra de óxidos formados por su exposición al aire. Al final el sistema se dejó enfriar hasta 30°C y el He se cambió por la mezcla de reacción: NO, SO<sub>2</sub>, NO/SO<sub>2</sub> y NO/SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, manteniendo el flujo de 100 mL/min. Las concentraciones de los gases usados en los experimentos fueron: NO, 500 ppm; SO<sub>2</sub>, 500 ppm; O<sub>2</sub>, 5% balance He. Las adsorciones fueron seguidas por Quimioluminiscencia cuando la mezcla contenía NO y por espectrometría de masas cuando se tenía SO<sub>2</sub> hasta la estabilización de las concentraciones. Para efectos de comparación se estudiaron las reacciones sobre la muestra pirolizada y activada (CA) y el material desmineralizado, pirolizado, activado e impregnado (Cu/CAD).

Después de dos horas de adsorción, la muestra fue analizada por XPS para identificar los complejos de C, N, O, S y Cu formados en la superficie. Los espectros XPS se tomaron en un equipo VG-Microtech Multilab Electron usando una fuente de rayos X Mg K $\alpha$  (15kV, 20mA). La corrección de energía por efectos de carga se realizó fijando el pico C1s en 284.6 eV. Para establecer los cambios en la concentración de los complejos superficiales debidos a

la reacción se tomó como referencia el material sometido a tratamiento térmico a 500°C en atmósfera de He y luego analizado por XPS.

Para establecer el efecto de cada reacción en la quimisorción reversible de NO y SO<sub>2</sub> y en la formación de complejos oxigenados se repitieron los experimentos y las muestras fueron sometidas a desorción a temperatura programada (DTP) *in-situ*. Después de las 2 horas de reacción la mezcla se cambió por He (50 mL/min) y durante 30 min se hizo una purga del sistema antes de iniciar el calentamiento de la muestra. El DTP se realizó a 15°C/min hasta 950°C en atmósfera de He y los productos gaseosos NO, SO<sub>2</sub>, CO y CO<sub>2</sub> fueron analizados con un espectrómetro de masas OmniStart tipo cuadrupolo.

**Caracterización de las muestras.** El análisis de área superficial y estructura de poro se realizó por medio de la adsorción de N<sub>2</sub> a 77K utilizando la teoría de BET y por adsorción de CO<sub>2</sub> a 273K usando la teoría de Dubinin, en un equipo ASAP 2010 de la marca Micromeritics, los resultados se presentan en la tabla 1, en la que se puede ver que se tienen materiales altamente porosos, además se ve el efecto de la desmineralización en el material impregnado por la clara diferencia en el área superficial.

Al material de partida (carbón sub-bituminoso de Amagá) se le hizo un análisis de fluorescencia de rayos X con el fin de determinar la composición de sus cenizas. La tabla 2 muestra los resultados obtenidos por esta técnica y se revela la necesidad de realizar la desmineralización debido al alto contenido de especies minerales como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO, las cuales han sido reportadas como buenos catalizadores para las reacciones de adsorción de gases contaminantes. (Davini, 2001; Hong *et al.*, 2002; Ma *et al.*, 2003).

**Tabla 1.** Análisis de área superficial y microporosidad.

Muestra	$S_{N_2}$		$S_{CO_2}$		$V_{CO_2}$	
	(m <sup>2</sup> /g)	26	(m <sup>2</sup> /g)	30	(cm <sup>3</sup> /g)	1x10 <sup>-2</sup>
CA	228		598		0.23	
Cu/CAD	711		937		0.40	

**Tabla 2.** Resultados del análisis de fluorescencia realizado al carbón inicial.

Compuesto	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	Otros
Porcentaje	12.3	9.7	13.4	3.1	11.1	25.2	22.4	2.8

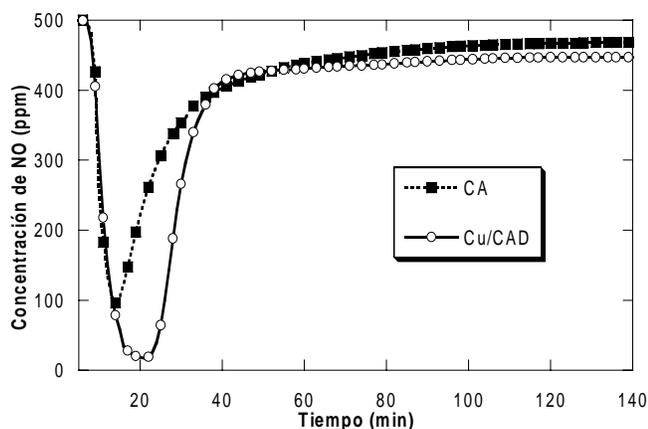
Otros: K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, SrO, NiO, CuO, Cl, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

A la muestra impregnada con cobre se le hizo un análisis de DRX con el fin de ver las especies cristalinas presentes. Con un equipo Seifert 3000P provisto de un cátodo de Cu y un filtro de Ni. En este análisis se evidenció la presencia de CuO evidenciado por los picos a  $35.4^\circ$  y  $38.6^\circ$ , correspondientes a los planos 002 y 111 de la estructura cristalina monoclinica del CuO y confirmado por la técnica de XPS donde se observó una señal con una energía enlazante de 932 eV correspondiente a  $\text{Cu}^{2+}$ .

## Resultados y discusión

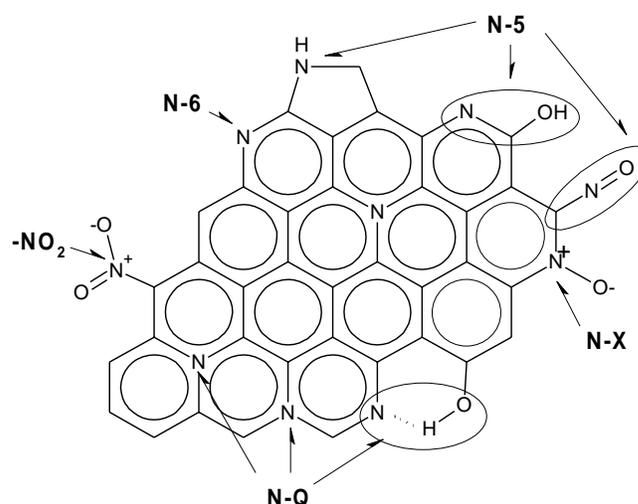
**Adsorción de NO.** Todas las curvas de adsorción que se presentan en este trabajo presentan un comportamiento similar en el que se aprecian dos etapas de la adsorción claramente diferenciadas, la primera en la que no se presentan rupturas (breakthrough) se da la difusión y adsorción de los gases principalmente en la superficie interna del catalizador, la segunda parte que es después del breakthrough se da principalmente la adsorción en los sitios activos de la superficie y el llenado completo de los poros, en esta etapa se presentan reacciones de adsorción-desorción-readsorción de algunos de los gases, finalmente, aunque la mayoría de las reacciones no se llevan hasta este punto en los procesos de adsorción sobre materiales porosos se presenta una tercera etapa que corresponde a la saturación del material por el agotamiento de los poros y los sitios activos disponibles (Izquierdo *et al.*, 2001).

La figura 1 presenta el seguimiento realizado a la adsorción de NO sobre las muestras, en esta se puede ver un leve favorecimiento en la adsorción de NO para la muestra impregnada con cobre evidenciado en un mayor tiempo de adsorción y una menor concentración de estabilización.



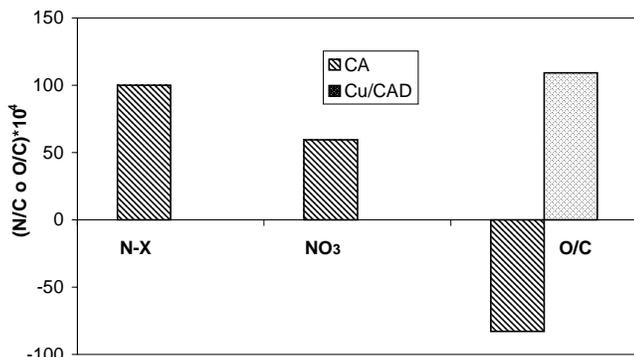
**Figura 1.** Perfil de la concentración de NO para la reacción de adsorción de NO sobre CA y Cu/CAD.

Para la cuantificación de los complejos presentes o formados sobre la superficie carbonosa por XPS se toman las áreas de los picos son normalizadas al área de carbono y estas a su vez son corregidas de acuerdo al factor de sensibilidad. Para establecer los cambios en la concentración de cada complejo de N, O, y S por efectos de la reacción, al valor de la relación calculada para cada complejo se le restó el correspondiente al material activado tratado con helio a  $500^\circ\text{C}$  sin reaccionar. La Figura 2 presenta esquemáticamente los posibles complejos nitrogenados que se pueden formar en una superficie carbonosa en la adsorción de NO y que pueden ser detectados por la técnica de XPS (Suzuki *et al.*, 1994).



**Figura 2.** Representación esquemática de los complejos nitrogenados en una superficie carbonosa que pueden ser identificados por XPS.

La Figura 3 presenta los complejos nitrogenados y oxigenados formados en la superficie cuando se hizo la adsorción del NO sobre el carbón activado (CA) y el carbón activado impregnado con cobre (Cu/CAD). Como puede observarse los complejos nitrogenados formados sobre el carbón activado (CA) fueron N-óxido de piridina (N-X) y nitratos ( $\text{NO}_3$ ), estos últimos formados probablemente sobre la materia mineral, ya que en un análisis de XPS realizado a la muestra de carbón activado desmineralizado solo se observó la formación de complejos N-cuaternario (N-Q) y  $\text{NO}_2$ . Para el material impregnado (Cu/CAD) no fue posible evidenciar complejos nitrogenados, lo que podría significar que se están adsorbiendo sobre agregados del catalizador o están siendo transferidos del catalizador a sitios más internos de la matriz carbonosa donde la técnica de XPS no puede detectarlos.



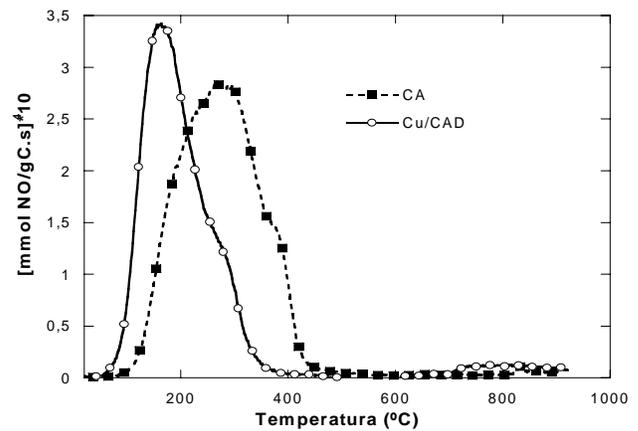
**Figura 3.** Complejos nitrogenados y oxigenados formados durante la adsorción de 500 ppm NO.

Con respecto a los complejos oxigenados se puede ver como para la muestra de CA esta ocurriendo una gasificación del material carbonoso, donde posiblemente se este presentando una quimisorción disociativa del NO, formando complejos de baja estabilidad que desorben como CO y CO<sub>2</sub>. La relación de CO/CO<sub>2</sub> obtenida del DTP después de la adsorción de NO sobre el carbón activado (CA) fue menor comparada con la relación CO/CO<sub>2</sub> obtenida del DTP para la misma muestra antes de la adsorción. Además, el análisis por XPS mostró una disminución en la señal O1s con energías enlazantes entre 532 eV y 534.8 eV las cuales corresponden a complejos oxigenados tales como C-O, C=O, -COO-, formados después de la adsorción de NO sobre esta muestra.

Los nitratos y nitritos se pueden descomponer a NO<sub>2</sub> los cuales se pueden transformar a NO y un complejo oxigenado en la superficie que resorbe como CO<sub>2</sub>. Se ha reportado que la superficie reductiva del carbón captura oxígeno del NO<sub>2</sub> y NO<sub>3</sub> para formar grupos funcionales oxigenados que desorben como CO y CO<sub>2</sub> en el DTP y libera especies NO (Shirahma *et al.*, 2002; García *et al.*, 2004).

Para el impregnado Cu/CAD se observa un aumento considerable de los complejos oxigenados, lo que podría significar que el NO se quimisorbe disociativamente sobre el catalizador y que el oxígeno se transfiere a la matriz carbonosa en un mecanismo de spill-over.

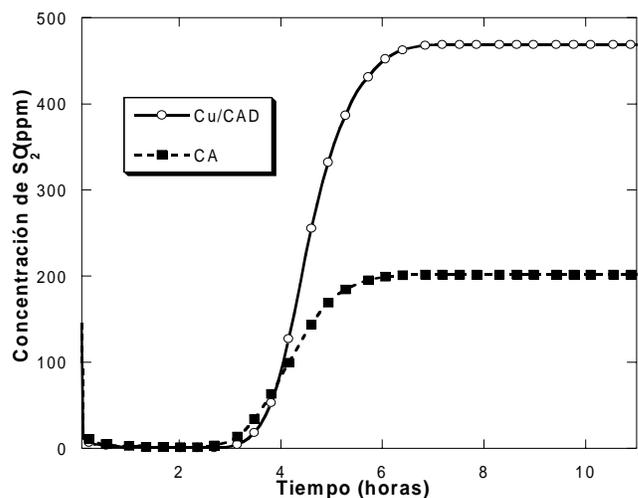
En la Figura 4 se presentan los perfiles de desorción del NO para las diferentes muestras. Son perfiles predominantemente unimodales con pequeños hombros a diferentes temperaturas. En el caso del Cu/CAD el perfil de desorción es más angosto y está centrado alrededor de los 180°C mientras que para el CA la desorción está centrada alrededor de 300°C. Esto es prueba de la diferencia en los



**Figura 4.** Perfiles de desorción de NO después de la adsorción de 500 ppm NO.

sitios activos de cada muestra. En el DTP el NO empieza a desorber desde temperaturas tan bajas como 50°C (para el Cu/CAD) hasta los 480°C, lo que significa que varios complejos de diferentes estabilidades térmicas están siendo formados sobre la superficie. El carbón activado CA presenta los complejos con mayor estabilidad térmica representados probablemente por los complejos de nitrato formados sobre la materia mineral, como fue observado en los resultados del XPS. Es interesante observar que los complejos de NO no fueron observados por XPS en la muestra Cu/CAD, sin embargo con la adsorción y la desorción se corrobora la adsorción de NO.

**Adsorción de SO<sub>2</sub>.** La Figura 5 presenta el perfil de la concentración de SO<sub>2</sub> para la adsorción de SO<sub>2</sub> sobre las muestras de CA y Cu/CAD. En esta se puede ver como



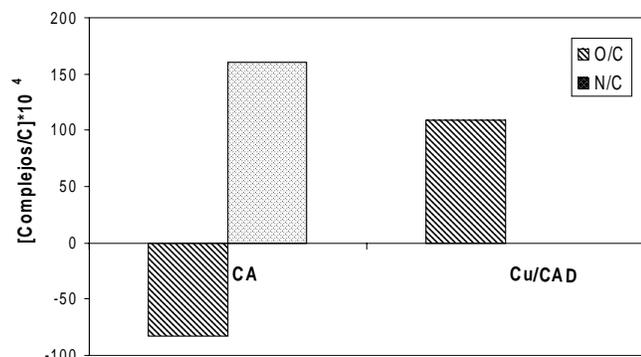
**Figura 5.** Perfil de la concentración de SO<sub>2</sub> para la adsorción de SO<sub>2</sub> sobre CA y Cu/CAD.

ambas muestras presentan tiempos similares de adsorción pero el Cu/CAD alcanza casi la concentración de entrada (500 ppm) indicando que los sitios activos están prácticamente saturados mientras que para el CA la concentración de SO<sub>2</sub> se estabiliza en un valor mucho menor, lo que implica que este sigue adsorbiendo por mas tiempo probablemente como un efecto de la materia mineral, como Fe y Ca, los cuales han mostrado actividad catalítica para la reacción de SO<sub>2</sub>-Carbon (Davini, 2001; Hong *et al.*, 2002).

Al ver los resultados obtenidos para la adsorción de NO y SO<sub>2</sub> se ve como ambos materiales adsorben mayor cantidad de SO<sub>2</sub> que de NO, lo que esta de acuerdo con la literatura en la cual se ha encontrado que el SO<sub>2</sub> presenta mejores adsorciones en materiales carbonosos (Das *et al.*, 2002).

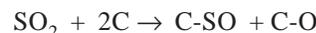
La figura 6 presenta el análisis cuantitativo por XPS para ambas muestras después de la adsorción de 500 ppm de SO<sub>2</sub>, sobre el CA se observo una señal S2p<sub>3/2</sub> a 168.2 eV correspondiente a complejos SO<sub>3</sub> acompañado de una disminución de los complejos oxigenados. Para el material impregnado Cu/CAD no se detectaron complejos azufre por XPS después de la adsorción de SO<sub>2</sub>, probablemente este ocurriendo lo mismo que con el NO donde el cobre cataliza la adsorción de estos gases en los intersticios del material, donde la técnica de XPS no puede detectarlos. Sin embargo, los complejos O/C se formaron en mayor cantidad indicando una transferencia de oxígeno a la matriz carbonosa posiblemente debido a una quimisorción disociativa del SO<sub>2</sub> sobre el catalizador, la cual ha sido ampliamente reportada en la literatura.

A continuación se presentan algunas de las investigaciones publicadas sobre este tipo de reacción. Lizzio y DeBarr (Lizzio *et al.*, 1996) plantearon la quimisorción

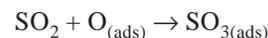
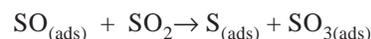


**Figura 6.** Complejos de azufre y oxígeno formados en la superficie de las muestras de CA y Cu/CAD después de la adsorción de SO<sub>2</sub>.

disociativa del SO<sub>2</sub> en dos sitios libres de la matriz carbonosa de la siguiente manera:



Sin embargo no se presentó ninguna evidencia experimental de la especie SO<sub>3</sub>. Rodríguez *et al.* (Rodríguez *et al.*, 2003) estudiaron de manera teórica y experimental la adsorción y descomposición del SO<sub>2</sub> sobre una superficie de TiC (001) por encima de 200K, encontrando que el SO<sub>2</sub> quimisorbe en S<sub>(ads)</sub> y O<sub>(ads)</sub>, y en una pequeña fracción de SO<sub>3</sub> y SO<sub>4</sub>. Sellers y Shustorovich (Sellers *et al.*, 1996) mediante cálculos ab initio de los calores de adsorción del SO<sub>2</sub> sobre cobre y níquel, estudiaron la disociación del SO<sub>2</sub>, la estabilidad del SO y la oxidación del SO<sub>2</sub>, encontrando: 1) que la disociación: SO<sub>2</sub> → S + O + O es la mas favorable, 2) la formación de SO sobre las superficies de Cu y Ni no fue favorable, y 3) el SO<sub>3</sub> es formado por la oxidación del SO<sub>2</sub> con un O<sub>(ads)</sub> previamente adsorbido. Li y Henrich (Li *et al.*, 1993) estudiaron la interacción del SO<sub>2</sub> sobre NiO por XPS y UPS, cuando se hizo la adsorción sobre una superficie de NiO con defectos a temperatura ambiente se observó una quimisorción disociativa del SO<sub>2</sub>, sugiriendo que las vacancias de oxígeno son los sitios activos para esta quimisorción. Lu *et al.* (Lu *et al.*, 1998) estudiaron por la técnica de espectroscopia fotoelectrónica de alta resolución la adsorción de SO<sub>2</sub> a temperatura ambiente sobre una superficie de Cu (100) y una superficie previamente oxidada, el siguiente mecanismo para la adsorción en la superficie de cobre libre de oxígeno fue propuesto:



En el caso de la superficie oxidada se inhibe la descomposición del SO<sub>2</sub> observando solamente la formación del SO<sub>3</sub>. Similares resultados fueron observados con la técnica de XPS para la adsorción de SO<sub>2</sub> sobre superficies de Cu (111) y Ni (111) a temperatura ambiente (Jackson *et al.*, 2000; Galtayries *et al.*, 2004). Como se puede observar hay suficiente información publicada que soporta la quimisorción disociativa del SO<sub>2</sub> sobre metales. Sin embargo, aun hay controversia sobre la manera más favorable como este se disocia en la superficie.

La Figura 7 presenta los perfiles de desorción del SO<sub>2</sub> para las muestras de CA y Cu/CAD. Ambos perfiles son bimodales centrados alrededor de 180°C y 400°C respecti-

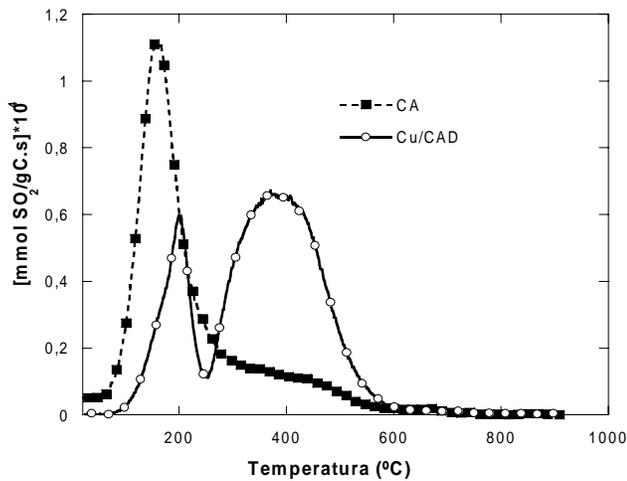


Figura 7. Perfiles de desorción de SO<sub>2</sub> después de la adsorción de 500 ppm SO<sub>2</sub>.

vamente. Sin embargo, las contribuciones de las dos señales son diferentes. En el caso de la muestra de CA la desorción a baja temperatura es la predominante (posiblemente SO<sub>2</sub> fisisorbido) mientras que para la muestra de Cu/CAD la contribución de la desorción a alta temperatura es más importante.

La muestra de Cu/CAD presenta mayor cantidad de SO<sub>2</sub> desorbido especialmente a altas temperaturas lo que indica que el cobre tiene una acción catalítica en el proceso de transformar el SO<sub>2</sub> en especies de mayor estabilidad que pueden ser adsorbidas más fuertemente en la matriz carbonosa posiblemente del tipo SO<sub>3</sub> o SO<sub>4</sub>. Los resultados del DTP complementados con el resultado de la adsorción para la muestra de Cu/CAD evidencia la adsorción de SO<sub>2</sub>, aunque por XPS no haya sido posible evidenciar la formación de especies azufradas para esta muestra.

**Adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub> y el efecto del O<sub>2</sub>.**  
Con el propósito de evaluar la adsorción simultánea de NO y SO<sub>2</sub> sobre los catalizadores se preparó una mezcla de 500 ppm NO/500 ppm SO<sub>2</sub> y se evaluó el efecto de la adición de O<sub>2</sub> a la mezcla de reacción. La figura 8 presenta los perfiles de adsorción de NO(a) y SO<sub>2</sub>(b) para la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub>, de esta se puede ver como para ambas muestras el cobre desempeña un papel catalítico favoreciendo la adsorción tanto de NO como la de SO<sub>2</sub>, comparado con la adsorción que se da en el carbón activado (CA). Un análisis un poco más profundo de estos resultados para el material impregnado revela que al comparar las adsorciones presentadas de NO y SO<sub>2</sub> en los procesos independientes y la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub> se ve un leve favorecimiento para la adsorción de SO<sub>2</sub> cuando se está en presencia de NO y una menor adsorción para

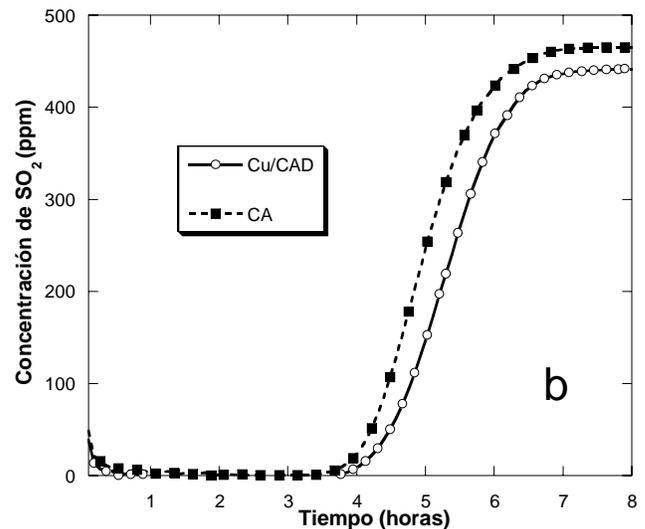
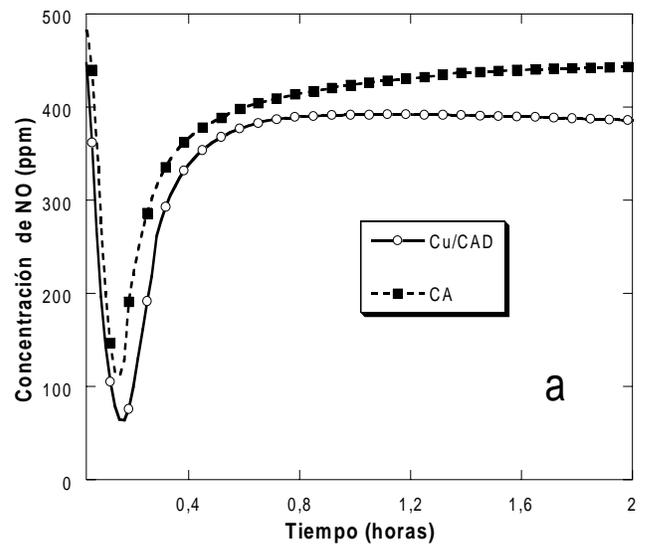


Figura 8. Perfil de la concentración de NO(a) y SO<sub>2</sub>(b) para la adsorción de SO<sub>2</sub>/NO sobre CA y Cu/CAD.

el NO cuando se tiene la presencia de SO<sub>2</sub>, lo que podría significar que el SO<sub>2</sub> se adsorbe en sitios activos en los que antes se adsorbía NO, y que el NO adsorbido posiblemente genera especies que favorecen la adsorción de SO<sub>2</sub>.

La figura 9 presenta los perfiles de NO y SO<sub>2</sub> para la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub> en la presencia de oxígeno. Se observa el claro papel catalítico que tiene el oxígeno formando nuevos sitios activos los cuales favorecen la adsorción en ambas muestras, además se ve como el material impregnado con cobre presenta las mejores adsorciones para ambos gases ratificando el papel catalítico del cobre.

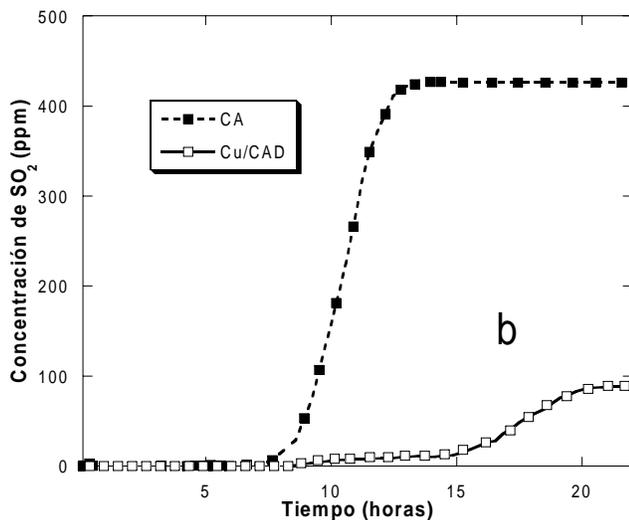
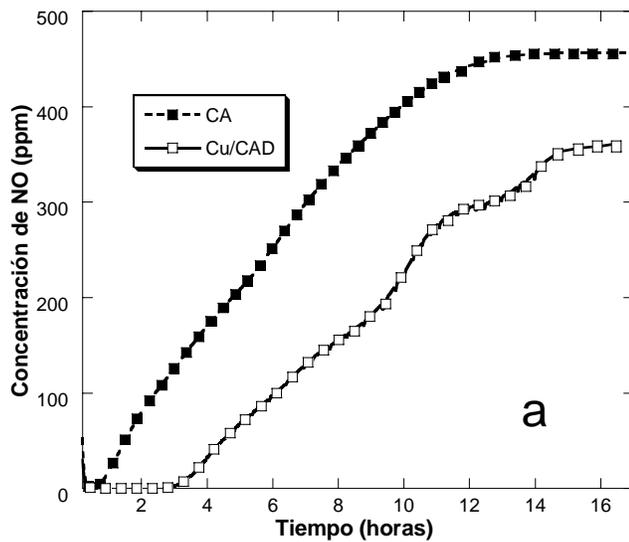


Figura 9. Perfil de la concentración de NO(a) y  $SO_2$ (b) durante la adsorción de  $SO_2/NO/O_2$  sobre CA y Cu/CAD.

La Figura 10 presenta los complejos nitrogenados formados sobre el carbón activado (CA) después de la adsorción de NO y  $SO_2$  en la ausencia y presencia de  $O_2$ , para efectos de comparación se adicionan los resultados obtenidos para la adsorción de solo NO. Como se observa en la figura, en la adsorción simultánea de NO y  $SO_2$  en la ausencia de  $O_2$  se formaron complejos N-óxido de piridina en menor proporción que cuando se hizo la adsorción con solo NO y complejos N-5 los cuales son de diferente naturaleza como se observó en la Figura 2. Al igual que lo encontrado con el análisis de adsorción la cantidad total de complejos nitrogenados fue menor en la presencia de  $SO_2$ , lo que significa que el  $SO_2$  inhibe parcialmente la adsorción

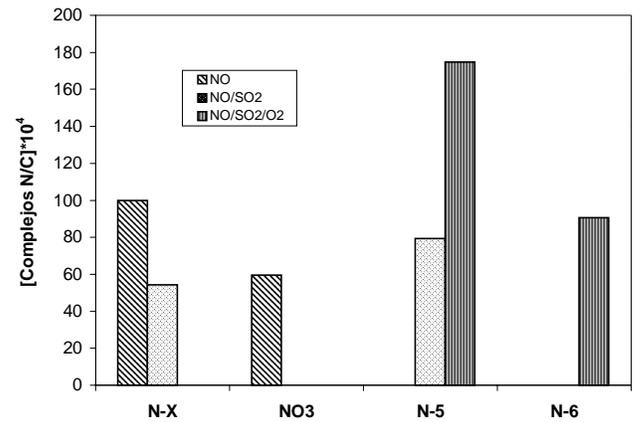


Figura 10. Complejos nitrogenados formados durante la adsorción simultánea de NO y  $SO_2$  sobre el carbón activado (CA).

del NO ocupando posiblemente los sitios activos donde el NO era adsorbido. Algunos autores han reportado una inhibición total sobre otros tipos de adsorbentes (Mochida *et al.*, 2000; Wilde *et al.*, 2000).

Sin embargo, en la presencia de  $O_2$  hubo un aumento drástico de los complejos N-5 y aparecieron los complejos N-6 correspondientes a N-piridínico, por lo tanto es claro que la adición de  $O_2$  favorece la adsorción del NO proporcionando sitios activos para su adsorción. Cuando se realizó el DTP de estas muestras se observó solo una muy pequeña cantidad de complejos que desorben como NO, lo que pudiera significar que los complejos N-5 y N-6 son del tipo pirrólico y piridínico, respectivamente, y por lo tanto muy estables a alta temperatura. Con el propósito de verificar esta hipótesis se realizó un análisis de XPS a la muestra de carbón activado después del DTP, los resultados obtenidos son resumidos en la Figura 11. Como se puede observar después del DTP permanecen los comple-

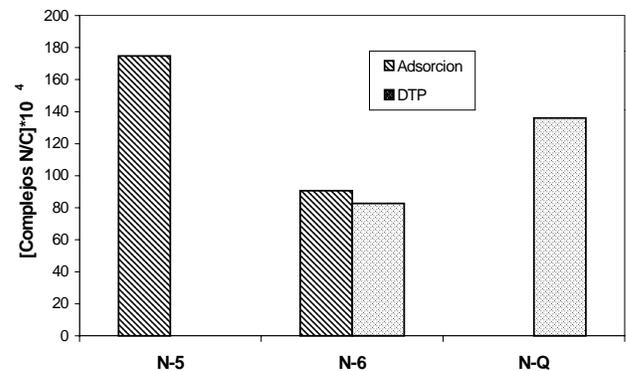
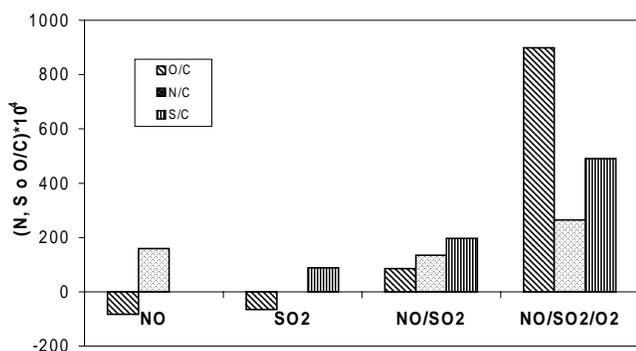


Figura 11. Complejos nitrogenados formados después de la adsorción simultánea de NO/ $SO_2/O_2$  y la desorción a temperatura programada para el carbón activado (CA).

jos N-piridínico (N-6) y se forman los N-Q debido probablemente a una transformación del nitrógeno pirrólico (N-5) a nitrógeno cuaternario por efectos de la temperatura. Por lo tanto se puede concluir que durante la adsorción simultánea de NO y SO<sub>2</sub> en la presencia de O<sub>2</sub> se presenta una quimisorción disociativa del NO y el nitrógeno es incorporado en la matriz carbonosa.

La Figura 12 resume los complejos totales formados después de las diferentes mezclas de adsorción sobre CA. La naturaleza de los complejos de azufre formados durante la adsorción simultánea en la ausencia y presencia de O<sub>2</sub> fueron los mismos que los observados durante la adsorción con solo SO<sub>2</sub> (señal S2p<sub>3/2</sub> a 168.2eV). Como puede observarse, los complejos de azufre aumentaron con la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub>, lo que significa que la presencia de NO favorece la adsorción del SO<sub>2</sub>. Bagreev et al. (Bagreev et al., 2002) reportaron que especies de nitrógeno como N-pirrólico, N-piridínico y nitrógeno cuaternario (N-Q) favorecen la adsorción del SO<sub>2</sub>, en acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación.

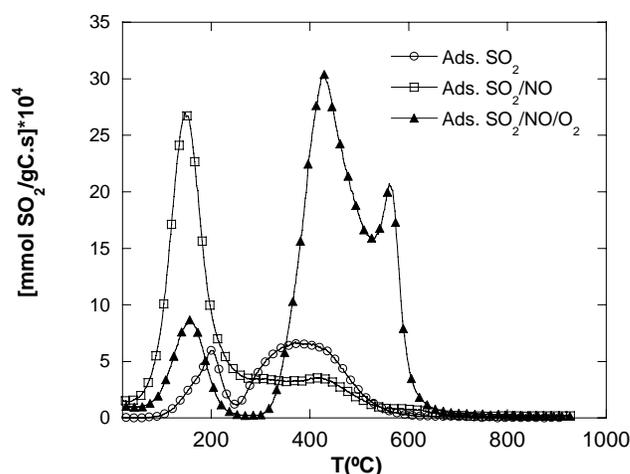


**Figura 12.** Complejos superficiales totales formados durante la adsorción sobre carbón activado (CA).

En presencia de O<sub>2</sub> los complejos de azufre y nitrógeno aumentaron en una mayor proporción mostrando un efecto sinérgico, donde el O<sub>2</sub> posiblemente se quimisorbe disociativamente suministrando sitios activos en la superficie como puede verse en el drástico aumento de los complejos oxigenados.

Para el material impregnado Cu/CAD, no se observaron complejos nitrogenados por XPS en ninguna de las mezclas de reacción, sin embargo cuando se hizo la adsorción simultánea se observaron complejos de azufre a 168.4 eV correspondientes al complejo SO<sub>3</sub> y estos complejos incrementaron en la presencia del O<sub>2</sub>, los complejos oxigenados aumentaron más drásticamente que en el caso de la muestra sin catalizador.

La Figura 13 presenta los perfiles de desorción del SO<sub>2</sub> para las diferentes adsorciones sobre la muestra de Cu/CAD. Podemos observar como la adición de NO favorece la desorción de complejos azufre a más bajas temperaturas, los cuales pueden corresponder a SO<sub>2</sub> físisorbido o SO<sub>3</sub> débilmente adsorbido. En la presencia de O<sub>2</sub> vemos como se favorecen en mayor cantidad los complejos de mayor estabilidad térmica, correspondiendo posiblemente a la descomposición de sulfatos que pudieron formarse sobre el cobre o en sitios más internos donde el XPS no puede detectarlos, como por ejemplo al interior de la estructura porosa de la matriz carbonosa.



**Figura 13.** Perfiles de desorción del SO<sub>2</sub> después de la adsorción de diferentes mezclas de reacción sobre el carbón impregnado (Cu/CAD).

Sin embargo, cuando se hizo un análisis el DTP de estas muestras se encontró que el impregnado presenta mayor desorción de SO<sub>2</sub> como puede verse en la Figura 14. Allí se puede apreciar que el efecto del catalizador es facilitar la adsorción de SO<sub>2</sub> o la transformación de este en especies más estables que desorben como SO<sub>2</sub> a alta temperatura y formándose en sitios activos dentro de los poros donde el XPS no puede detectarlos.

**Posibles rutas mecanísticas.** Diferentes mecanismos de reacción han sido propuestos en la literatura para la adsorción de NO y SO<sub>2</sub>. Para la adsorción de SO<sub>2</sub> la mayoría de los estudios coinciden en proponer que hay un primer paso donde el SO<sub>2</sub> es adsorbido en la superficie del carbón activo (Py et al., 1995; Mochida et al., 2000; Wilde et al., 2000). Davini sugiere que los grupos básicos superficiales son los responsables de la quimisorción disociativa del SO<sub>2</sub>. Bagreev et al. (Bagreev et al., 2002) mostraron

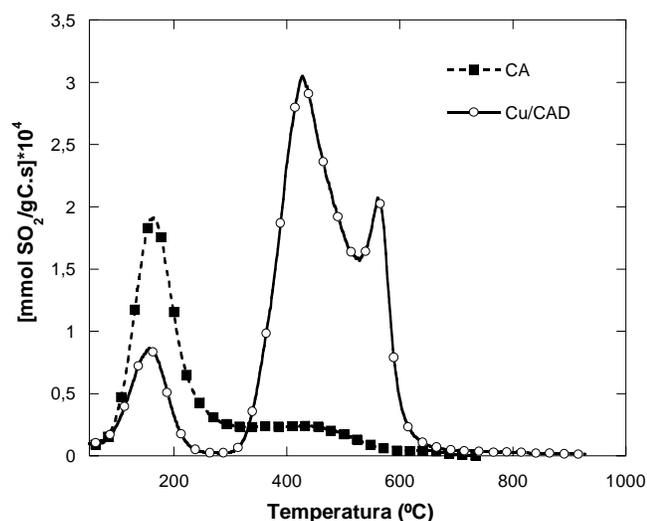


Figura 14. Perfiles de desorción del SO<sub>2</sub> después de la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> sobre ambas muestras de carbón.

que especies nitrogenadas presentes en el carbón activado, como N-piridínico y cuaternario parecen tener influencia favorable en la adsorción del SO<sub>2</sub>. En la presencia de O<sub>2</sub>, Raymundo et al. (Raymundo et al., 2001) propusieron un mecanismo siguiendo un modelo cinético Eley-Rideal para explicar la oxidación de SO<sub>2</sub>, primero siendo este adsorbido en la superficie y luego reaccionando con el O<sub>2(g)</sub> para dar SO<sub>3</sub> adsorbido. Mochida et al. (Mochida et al., 2000) han propuesto que el O<sub>2</sub> se adsorbe reversiblemente en la superficie del carbón el cual luego oxida el SO<sub>2</sub> adsorbido. Todas estas propuestas de mecanismos se han basado principalmente en los resultados de las actividades de adsorción y en desorción del SO<sub>2</sub> por la técnica de DTP, sin embargo no hay una evidencia clara de la formación del complejo SO<sub>3</sub>.

Los resultados encontrados en esta investigación para la adsorción de SO<sub>2</sub> sobre carbón activado (CA) dan evidencia de la formación del complejo SO<sub>3</sub> observado por XPS con una energía enlazante de 168.2 eV, este complejo se forma posiblemente por oxidación del SO<sub>2</sub> con un complejo oxigenado presente en la superficie del carbón. Para la muestra de carbón impregnado con cobre (Cu/CA) se observó un aumento considerable de los complejos oxigenados lo que podría significar que el SO<sub>2</sub> esta siendo quimisorbido disociativamente sobre el catalizador y el oxígeno está siendo transferido a la superficie carbonosa. De los resultados del DTP podemos evidenciar la formación de dos tipos de complejos SO<sub>3</sub>, uno débilmente adsorbido que desorbe como SO<sub>2</sub> aproximadamente a 180°C el cual es formado principalmente sobre el carbón activado y uno mas fuertemente adsorbido que desorbe a tem-

peraturas superiores de 300°C observado principalmente en el carbón impregnado con cobre, dejando un oxígeno sobre la superficie del carbón que luego desorbe como CO<sub>2</sub> o CO a temperaturas mas altas.

Para la adsorción de NO, los mecanismos propuestos en la literatura coinciden principalmente en la formación de un complejo NO<sub>2</sub> siempre y cuando el O<sub>2</sub> este presente en la mezcla gaseosa sugiriendo que los grupos oxigenados mejoran la adsorción del NO (Mochida et al., 1994; Mochida et al., 2000; Wilde et al., 2000). Estos estudios no presentan una evidencia clara de la formación de este complejo. García et al. (García et al., 2002) en un trabajo previo reportaron la formación de complejos N-piridínico (N-6) y -NO<sub>2</sub> por XPS durante la adsorción de NO a 100°C sobre un carbonizado de carbón, el complejo NO<sub>2</sub> se formó posiblemente por la quimisorción disociativa de NO en una superficie la cual posee complejos oxigenados.

En esta investigación se encontró que los complejos nitrogenados formados durante la adsorción de NO a 30°C sobre un carbón activado corresponden a complejos N-óxido de piridina (N-X) y nitrato (NO<sub>3</sub>), este último formado posiblemente sobre la materia mineral. Para la muestra de carbón impregnado con cobre (Cu/CA) se observó un aumento considerable de los complejos oxigenados lo que podría significar que el NO esta siendo quimisorbido disociativamente sobre el catalizador y el oxígeno está siendo transferido a la superficie carbonosa. De los resultados del DTP podemos evidenciar la formación de tres tipos de complejos que desorben como NO, uno a baja temperatura correspondiente a NO débilmente adsorbido sobre la muestra impregnada con cobre, y para la muestra de carbón activado se observó principalmente un complejo mas fuertemente adsorbido y un hombro alrededor de los 400°C el cual pudiera corresponder a descomposición de los nitratos formados sobre la materia mineral.

Son muy pocos los trabajos publicados sobre la adsorción simultánea de NO y SO<sub>2</sub> y aún más escaso encontrar evidencia experimental de los complejos propuestos. Rubel y Stencel (Rubel et al., 1997) proponen que el NO<sub>(ads)</sub> y SO<sub>2(ads)</sub> son las especies que se forman durante la adsorción simultánea de estos gases. Qiang et al. (Qiang et al., 2005) proponen que durante la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub> se crea una nueva especie intermedia [(NO<sub>2</sub>)(SO<sub>3</sub>)]<sub>(ads)</sub>, sin embargo no presenta una evidencia experimental de la formación de este complejo. Davini (Davini, 1993) propone que el NO ayuda a crear o estabilizar óxidos básicos superficiales los cuales mejoran la adsorción del SO<sub>2</sub>.

Durante esta investigación se encontró que durante la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub> se formaron los complejos nitrogenados N-X y N-5 siendo este último probablemente N-pirrólico debido a que no fue desorbido durante el DTP. En presencia de O<sub>2</sub> los complejos nitrogenados aumentaron drásticamente y se formaron los complejos N-pirrólico(N-5) y piridínico (N-6), los cuales favorecen la adsorción del SO<sub>2</sub> y están en acuerdo con lo reportado en la literatura (**Bagreev et al.**, 2002).

Con respecto a los complejos de azufre, tanto en la ausencia como en la presencia de O<sub>2</sub> se formó el complejo SO<sub>3</sub> en la superficie carbonosa, la especie activa del catalizador fue el CuO el cual reacciona fácilmente con el SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> para formar sulfatos (**Mochida et al.**, 2000). Del análisis del DTP del carbón impregnado con cobre se observó la presencia de al menos tres complejos con diferentes estabildades térmicas, uno SO<sub>3</sub> débilmente adsorbido, otro SO<sub>3</sub> mas fuertemente adsorbido que desorbe aproximadamente a 420°C y otro alrededor de 580°C correspondiente a la descomposición de sulfatos formados posiblemente sobre la superficie del cobre.

## Conclusiones

Durante la adsorción de NO sobre carbón activado se formaron los complejos N-X y NO<sub>3</sub>.

El complejo SO<sub>3</sub> fue el único complejo observado durante la adsorción de SO<sub>2</sub>. La cantidad de SO<sub>2</sub> desorbido fue mayor para el carbón activo impregnado con cobre.

Durante la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub> se presentó una disminución de los complejos nitrogenados debido a una inhibición por parte del SO<sub>2</sub> el cual compite por sitios activos. Sin embargo, la adsorción del SO<sub>2</sub> se favoreció con la presencia de las especies nitrogenadas. La cantidad de SO<sub>2</sub> desorbido fue mayor para el carbón impregnado con cobre.

La presencia del O<sub>2</sub> en la adsorción simultánea de NO/SO<sub>2</sub> tuvo un efecto sinérgico favoreciendo la formación del complejo SO<sub>3</sub> y complejos nitrogenados del tipo N-pirrólico y N-piridínico. La cantidad de SO<sub>2</sub> desorbido fue favorecida por la presencia del cobre como catalizador.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Banco de la República la financiación del proyecto No. 1867, a la Universidad de Antioquia por la financiación del programa de Sostenibilidad. D.L. agradece al CYTED y a la Universidad de Alicante, España, por la pasantía de investigación y R.B.

agradece a la universidad de Antioquia por el programa jóvenes investigadores.

## Bibliografía

- Agency, U. S. E. P.** (2006). U.S. Environmental Protection Agency. [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
- Bagreev, A., S. Bashkova and T. J. Bandoz.** (2002). Adsorption of SO<sub>2</sub> on activated carbons: the effect of nitrogen functionality and pore sizes. *Langmuir* **18**: 1257-1264.
- Bishop, M. and D. L. Ward** (1958). The direct determination of mineral matter in coal. *Fuel* **37**: 191-199.
- Boardman, R. D. and D. L. Smoot** (1993). Fundamentals of coal combustion for clean and efficient use. Amsterdam, Elsevier Science Publishers.
- Das, A. K., G. B. Marin, D. Constales and G. S. Yablonsky** (2002). Effect of surface nonuniformity on the kinetics of simultaneous adsorption of SO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> over Na-g-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sorbent: a coverage-dependent stoichiometry. *Chemical Engineering Science* **57**: 1909-1922.
- Davini, P.** (1993). Adsorption and desorption of sulphur dioxide from simulated flue gas on active carbon: The effect of the ash content. *Carbon* **31**(1): 47-51.
- Davini, P.** (2001). The effect of certain metallic derivates on the adsorption of sulphur dioxide on active carbon. *Carbon* **39**: 419-424.
- Davini, P.** (2001). SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> adsorption properties of activated carbons obtained from a pitch containing iron derivatives. *Carbon* **39**: 2173-2179.
- Farrauto, R. J. and C. H. Bartholomew** (1997). Fundamentals of industrial catalytic processes. London, Blakie Academic & Professional.
- Galtayries, A., C. Cousi, S. Zanna and P. Marcus** (2004). SO<sub>2</sub> adsorption at room temperature on Ni(111) surface studied by XPS. *Surface and Interface Analysis* **36**(8): 997-1000.
- García, P., F. Coloma, C. S. M. d. Lecea and F. Mondragón** (2002). Nitrogen complexes formation during NO-C reaction at low temperature in presence of O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O. *Fuel Processing Technology* **77-78**: 255-259.
- García, P., J. F. Espinal, C. S. M. d. Lecea and F. Mondragón** (2004). Experimental characterization and molecular simulation of nitrogen complexes formed upon NO-char reaction at 270 °C in the presence of H<sub>2</sub>O and O<sub>2</sub>. *Carbon* **42**: 1507-1515.
- Gilot, P., M. Guyon and B. R. Stanmore** (1997). A review of NOx reduction on zeolitic catalysts under diesel exhaust conditions. *Fuel* **76**(6): 507-515.
- Hong, I., H. Jiang, Y.-D. Park, J.-Y. Kim and B.-H. Ha** (2002). Metal dispersed activated carbon fibers and their application for removal of SOx. *Chemical Physics Letters* **366**: 572-577.
- Izquierdo, M. T., B. Rubio, M. J. Lázaro and R. Moliner.** (2001). Eliminación de SO<sub>2</sub> y NOx mediante catalizadores carbonosos procedentes de carbones de bajo rango. Instituto de Carboquímica (CSIC). 97-102.

- Jackson, G. J., S. M. Driver, D. P. Woodruff, N. Abrams, R. G. Jones, M. T. Butterfield, M. D. Crapper, B. C. C. Cowie and V. Formoso** (2000). A structural study of the interaction of SO<sub>2</sub> with Cu(111). *Surface Science* **459**: 234-244.
- Kikuyama, S., A. Miura, R. Kikuchi, T. Takeguchi and K. Eguchi** (2004). SO<sub>x</sub> sorption-desorption characteristics by ZrO<sub>2</sub>-based mixed oxides. *Applied Catalysis* **259**: 191-197.
- Krijnsen, H.** (2000). *Advanced Control of NO<sub>x</sub>*. Chemistry. Delf, Delf University: 189-192.
- Li, X. and V. E. Henrich** (1993). Reaction of SO<sub>2</sub> with stoichiometric and defective NiO(100) surfaces. *Physical Review B* **48**(23): 17486-17492.
- Lizzio, A. A. and J. A. DeBarr** (1996). Effect of surface area and chemisorbed oxygen on the SO<sub>2</sub> adsorption capacity of activated char. *Fuel* **75**(13): 1515-1522.
- Lu, H., E. Janin, M. E. Dávila, C. M. Pradier and M. Giithelid** (1998). Adsorption of SO<sub>2</sub> on Cu(100) and Cu(100)-c(2 x 2)-O surfaces studied with photoelectron spectroscopy. *Vacuum* **49**(3): 171-174.
- Ma, J., Z. Liu, S. Liu and Z. Zhu** (2003). A regenerable Fe/AC desulfurizer for SO<sub>2</sub> adsorption at low temperatures. *Applied Catalysis B: Environmental* **45**: 301-309.
- Mochida, I., S. Kawano, S. Kisamori, H. Fujitsu and T. Maeda** (1994). Reduction of low concentration NO with NH<sub>3</sub> over pitch based active carbon fiber in humid air at ambient temperature. *Carbon* **32**(1): 175-177.
- Mochida, I., Y. Korai, M. Shirahama, S. Kawano, T. Hada, Y. Seo, M. Yoshikawa and A. Yasutake** (2000). Removal of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> over activated carbon fibers. *Carbon* **38**: 227-239.
- Pârvulescu, V. I., S. Boghosian, V. Pârvulescu, S. M. Jung and P. Grange** (2003). Selective catalytic reduction of NO with NH<sub>3</sub> over mesoporous V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> catalysts. *Catalysis* **217**(1): 172-185.
- Py, X., C. Roizard and N. Midoux** (1995). Kinetics of sulfur dioxide oxidation in slurries of activated carbon and concentrated sulfuric acid. *Chemical Engineering Science* **50**(13): 2069-2079.
- Qiang, T., Z. Zhigang, Z. Wenpei and C. Zidong** (2005). SO<sub>2</sub> and NO selective adsorption properties of coal-based activated carbons. *Fuel* **84**: 461-465.
- Radovic, L. R. and F. Rodriguez-Reinoso** (1997). *Chem. Phys. Carbon*. **25**: 243.
- Raymundo, E. P., D. C. Amorós and A. L. Solano** (2001). Temperature Programmed desorption study on the mechanism of SO<sub>2</sub> oxidation by activated carbon and activated carbon fibres. *Carbon* **39**: 231-242.
- Rodriguez, J. A., P. Liu, J. Dvorak, T. Jirsak, J. Gomes, Y. Takahashi and K. Nakamura** (2003). Adsorption and decomposition of SO<sub>2</sub> on TiC(0 0 1): An experimental and theoretical study. *Surface Science* **543**: L675-L682.
- Rubel, A. M. and J. M. Stencel** (1997). The effect of low concentration SO<sub>2</sub> on the adsorption of NO from gas over activated carbon. *Fuel* **76**: 521-526.
- Sellers, H. and E. Shustorovich** (1996). Chemistry of sulfur oxides on transition metal surfaces: a bond order conservation-Morse potential modeling perspective. *Surface Science* **356** (1996) 209-221 **356**: 209-221.
- Shirahma, N., S. H. Moon, K. H. Choi, T. Enjoji, S. Kawano and Y. Korai** (2002). Mechanistic study on adsorption and reduction of NO<sub>2</sub> over activated carbon fibers. *Carbon* **40**: 2605-2611.
- Suzuki, T., T. Kyotani and A. Tomita** (1994). Study on the Carbon-Nitric Oxide Reaction in the Presence of Oxygen. *Ind. Eng. Chem. Res* **33**(11): 2840-2845.
- Tomita, A.** (2001). Suppression of nitrogen oxides emission by carbonaceous reductants. *Fuel Processing Technology* **71**: 53-70.
- Tseng, H.-H. and M.-Y. Wey** (2004). Study of SO<sub>2</sub> adsorption and thermal regeneration over activated carbon-supported copper oxide catalysts. *Carbon* **42**: 2269-2278.
- Tseng, H.-H., M.-Y. Wey and C.-H. Fu** (2003). Carbon materials as catalyst supports for SO<sub>2</sub> oxidation: catalytic activity of CuO-AC. *Carbon* **41**: 139-149.
- Wilde, J. D. and G. B. Marin** (2000). Investigation of simultaneous adsorption of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> on Na-g-alumina with transient techniques. *Catalysis Today* **62**: 319-328.
- Zhang, W., H. Yahiro, N. Mizuno, J. Izumi and M. Iwamoto** (1992). Adsorption-desorption Properties of Nitrogen Monoxide on Metal Ion-exchanged Zeolites. *Chemistry Letters* **21**(5): 851.
- Zhang, W., H. Yahiro, N. Mizuno, J. Izumi and M. Iwamoto** (1993). Removal of nitrogen monoxide on copper ion-exchanged zeolites by pressure swing adsorption. *Langmuir* **9**: 2337-2332.

Recibido: abril 13 de 2007

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2008

# DIVERSIDAD DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS EN UN NACIMIENTO DE RÍO EN EL PÁRAMO DE SANTURBÁN, NORTE DE SANTANDER

Por

Pablo Manuel Castellanos<sup>1</sup> & Clemencia Serrato<sup>2</sup>

## Resumen

**Castellanos, P. M. & C. Serrato:** Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en un nacimiento de río en el Páramo de Santurbán, Norte de Santander. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(122): 79-86, 2008. ISSN 0370-3908.

Entre septiembre del 2005 y febrero del 2006, se realizó un estudio para determinar la diversidad de macroinvertebrados acuáticos en un nacimiento de río ubicado en el Páramo de Santurbán, Norte de Santander. La comunidad de macroinvertebrados encontrada estuvo conformada por 63 taxones, pertenecientes a 30 familias y 12 órdenes, siendo el Orden Diptera el más diverso. La estación 3 presentó la mayor riqueza y abundancia de organismos. Los taxones colectados más abundantes fueron el microcrustaceo *Hyaella* sp. y el Ephemeroptera *Prebaetodes* sp. En general, el nacimiento presentó una diversidad biológica moderada y una dominancia baja. Adicionalmente, los valores de similitud indicaron una alta variabilidad en la composición de especies entre estaciones.

**Palabras clave:** macroinvertebrados acuáticos, diversidad, nacimientos y cabeceras de río.

## Abstract

From September 2005 to February 2006, we carried out a study to determine the diversity of aquatic macroinvertebrates in a headwater stream in the Moorland of Santurbán, Norte de Santander. Macroinvertebrate community consisted of 63 taxa, 30 families and 12 orders, being the order Diptera the most diverse. The station 3 presented the biggest richness and abundance. The most abundant taxa were the Amphipoda *Hyaella* sp. and the Ephemeroptera *Prebaetodes* sp. In general, the stream showed a moderate diversity and a low dominance. Additionally, the range of similarity values suggests a high variability in species composition between stations.

**Key words:** aquatic macroinvertebrates, diversity, headwater streams and springs.

<sup>1</sup> Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga Colombia. pablouis@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad de la Amazonía, Programa de Biología. Florencia, Caquetá.

## Introducción

El páramo es un ecosistema que se caracteriza por su gran capacidad para captar y almacenar agua, aportando al país buena parte del agua potable, debido a que muchos de los ríos tienen sus cabeceras y nacimientos en ellos (Rangel, 2000). Estos nacimientos son importantes para el funcionamiento de los sistemas de rivera y presentan la mayoría de las propiedades estructurales y funcionales de los sistemas lóticos de mayor orden (Grubaugh *et al.*, 1997). Sin embargo, han sido considerados menos complejos y han sido poco estudiados, lo que genera que reciban poca protección especialmente de las actividades de manejo y uso de tierra (Benda *et al.*, 2005).

En la región del Nudo de Santurbán, se localizan numerosos nacimientos de agua que posteriormente surten a los principales ríos del Norte de Santander como el Zulia, Pamplonita y Sardinata; en esta región la reducción de cobertura vegetal original se ha acelerado por la intervención antrópica, lo cual puede afectar en alto grado los cuerpos de agua que nacen allí, perturbando las comunidades que en ellos se desarrollan.

Entre las comunidades que habitan estos sistemas se encuentran los macroinvertebrados acuáticos, que comprenden una gran parte de la diversidad biológica, siendo con frecuencia el principal componente animal de los sistemas lóticos (Esteves, 1988). Estos organismos juegan un papel importante en la red trófica de sistemas dulceacuícolas controlando la cantidad y distribución de sus presas y constituyendo una fuente alimenticia para consumidores terrestres y acuáticos (Wade *et al.*, 1989), e igualmente, al acelerar la descomposición de detritos (Wallace & Webster, 1996) y contribuir al reciclaje de nutrientes (Wallace *et al.*, 1997). El conocimiento de la actividad biológica de estos organismos permite entender la dinámica del sistema que habitan y los estudios basados en su taxonomía y distribución, proveen información importante para comprender la ecología y el papel que desempeñan en el medio. Pero a pesar de su importancia, la información disponible de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en el país es aun insuficiente (Roldan, 2001) siendo aun mas escasa la información publicada respecto a su dinámica en cabeceras y nacimientos de ríos. La mayoría de estudios se han desarrollado en sistemas de mayor orden en los departamentos del Antioquia (Posada *et al.*, 2000) y Valle del Cauca (Zúñiga *et al.*, 1994; Caicedo & Palacios, 1998), y en la Sabana de Bogotá (Riss *et al.*, 2002) y Gutiérrez *et al.*, 2002; 2006).

A pesar de todos los avances en Colombia, hasta el momento no existen reportes sobre la biota acuática pre-

sente en la zona del Páramo de Santurbán. El propósito de esta investigación fue determinar la diversidad de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en un nacimiento de río, en el Páramo de Santurbán, y sentar bases para futuros estudios en taxonomía, ecología dinámica poblacional y control de la calidad del agua en la zona de estudio.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El nacimiento objeto de estudio, que se denominará en adelante "El Mortiño", es afluente de la Quebrada la Plata y se localiza en la Vereda el Aventino, perteneciente al Municipio de Mutiscua, en la región del Nudo de Santurbán, Departamento del Norte de Santander. Presenta una longitud aproximada de 850 m desde su nacimiento hasta la desembocadura en la quebrada. El nacimiento El Mortiño se encuentra en la franja de subpáramo o páramo bajo, atmosféricamente húmedo. Su parte alta se ubica a los 7°15'42" N y 72°46'29" O a 3306 m.s.n.m. y desemboca en la Quebrada La Plata a los 7°16'00" N y 72°46'37" O a una altitud de 3120 m.s.n.m. La región del Nudo de Santurbán presenta un ciclo hidrológico unimodal, con una precipitación media anual de 1290.7 mms, con un periodo de baja precipitación que comprende los meses de diciembre a marzo, y un periodo de alta precipitación comprendido entre abril y noviembre (Rangel, 2000). El uso del suelo en el sector es principalmente agrícola y presenta una escasa superficie forestal.

### Muestreo y análisis

Se realizaron cinco salidas de campo, entre septiembre del 2005 y febrero del 2006, teniendo en cuenta que los muestreos comprendiesen parte de la temporada de alta y baja precipitación. Basados en el gradiente altitudinal, se ubicaron tres estaciones distribuidas a lo largo del cuerpo de agua, en la parte alta, media y en la desembocadura. Con el fin de describir el hábitat, en cada estación se registraron *in situ* los parámetros de temperatura, pH, y conductividad, empleando una sonda multiparámetro portátil marca Eijkelkamp, y el oxígeno disuelto se registró mediante un oxímetro marca YSI.

En cada estación se marcó un transecto de 10 metros en donde se colectaron 9 muestras de macroinvertebrados tomadas al azar, empleando una red Surber de 30 x 30 cm; abarcando 1m<sup>2</sup> por estación. Los individuos colectados fueron depositados en frascos plásticos debidamente rotulados, con alcohol al 70% para su preservación.

Los macroinvertebrados fueron transportados al Laboratorio de Limnología de la Universidad Industrial de Santander, UIS, donde se separaron empleando un microscopio estereoscópico marca Zeiss y se identificaron hasta el mínimo nivel taxonómico con la ayuda de las claves de **McCafferty**, (1981); **Roldán**, (1988); **Machado**, (1989); **Pennak**, (1989); **Merritt & Cummins** (1996); **Muñoz-Quesada** (1997); **Domínguez & Fernández**, (2001); y **Posada & Roldán**, (2003). Para la identificación de los quironómidos se siguió la metodología descrita por **Epler** (2001).

Para describir la comunidad en los diferentes puntos de muestreo se emplearon los parámetros biológicos de riqueza de especies, diversidad biológica de Shannon – Wiener ( $H'$ ) y dominancia de Simpson ( $D$ ). Finalmente, con el objetivo de comparar el grado de similitud entre las estaciones se empleó el coeficiente de Jaccard ( $J$ ) y se realizó un dendrograma de disimilitud como método de representación gráfica, empleando el algoritmo UPGMA.

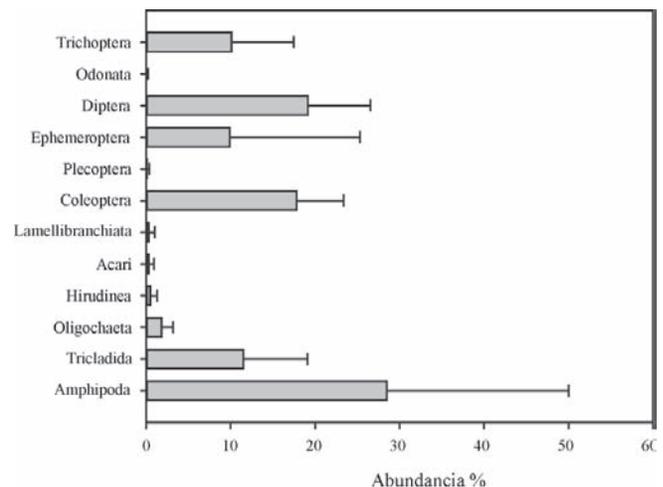
## Resultados

Los rangos de las variables fisicoquímicas se presentan en la Tabla 1. El valor mínimo de temperatura del agua fue  $10.6^{\circ}\text{C}$  y ocurrió durante de febrero del 2006 en la estación 1, mientras el valor máximo registrado,  $17.8^{\circ}\text{C}$ , se presentó durante el mes de noviembre en la estación 3. La concentración de oxígeno disuelto mínima,  $4.0\text{ mg/l}$ , fue registrada para la estación 1 en el mes de septiembre del 2005 y la concentración máxima de oxígeno disuelto,  $7.1\text{ mg/l}$ , se presentó en la estación 3 durante de enero del 2006. El pH varió de 6.1 unidades en la estación 1 en octubre del 2005 a 7.7 en la estación 2 en febrero del 2006. La conductividad varió de  $14.2\text{ }\mu\text{S/cm}$  en la estación 3 en noviembre del 2005 a  $45.7\text{ }\mu\text{S/cm}$  en la estación 2 en febrero del 2006.

El listado general de taxones registrado en toda el área de estudio se presenta en la Tabla 2. Un total de 4845 individuos de macroinvertebrados acuáticos fueron colectados, pertenecientes a 63 taxones de 30 familias y 12 órdenes.

El orden más diverso fue Díptera con 32 morfoespecies, alcanzando una representatividad del 50.8% de los taxones. En la Figura 1, se muestra la contribución porcentual de cada orden. El Orden Amphipoda presentó la mayor abundancia con 1068 individuos, y entre los artrópodos el Orden Diptera fue el más abundante con 990 individuos. Los valores de los parámetros de diversidad alfa son presentados en la Tabla 3. El promedio de la riqueza de especies en cada estación durante los cinco muestreos varió de 11 en la estación 3 en Octubre del 2005 a 30 en la estación 3 en enero del 2006. En general, el número de taxones fue menor en la estación uno, presentando poca diferencia con relación a la estación 2, y fue considerablemente mayor en la estación 3. La variabilidad de la riqueza específica en la cuenca, muestra que los valores más altos se encuentran en el sector ubicado en la desembocadura. En las estaciones de la parte alta y media estos valores son menores, variando de 11 a 20 especies (Tabla 3).

El promedio de individuos de los cinco muestreos en cada estación varió de 174 en la estación 2 en septiembre del 2005 a 627 en la estación 3 en febrero del 2006. La estación que presentó mayor abundancia de individuos



**Figura 1.** Abundancia porcentual de los órdenes de macroinvertebrados acuáticos hallados durante todo el estudio.

**Tabla 1.** Rangos de las variables fisicoquímicas.

Parámetro	Septiembre	Octubre	Noviembre	Enero	Febrero
Temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ )	12.0 - 12.5	15.2 - 16.7	15.7 - 18.3	11.2 - 13.1	10.6 - 16.5
Oxígeno disuelto (mg/l)	4.0 - 7.0	4.9 - 7.0	5.1 - 7.0	5.8 - 7.1	5.1 - 6.6
pH (unidades)	6.5 - 6.7	6.1 - 6.6	6.6 - 7.9	6.2 - 6.9	7.1 - 7.7
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	21.8 - 39.3	19.5 - 43.6	14.2 - 41.9	24.0 - 32.2	26.5 - 45.7

**Tabla 2.** Macroinvertebrados acuáticos encontrados en el Nacimiento el Mortiño durante todo el estudio.

Orden	Familia	Género	
Tricladida	Planariidae	Planariidae	
Oligochaeta	Haplotaxidae	Haplotaxidae	
Hirudinea	Glossiphoniidae	Glossiphoniidae	
Lamellibranchiata	Sphaeridae	Sphaeridae	
Acari	Hydrachnidia	Hydrachnidia	
Amphipoda	Hyalellidae	<i>Hyalella</i> sp.	
Coleoptera	Scirtidae	<i>Prionocyphon</i> sp.	
	Elmidae	<i>Heterelmis</i> sp. (l)	
		<i>Heterelmis</i> sp. (a)	
		<i>Stenelmis</i> sp.	
		<i>Microcylloepus</i> sp.	
		<i>Pseudodisersus</i> sp.	
	Lutrochidae	<i>Lutrochus</i> sp.	
Ptylodactilidae	<i>Anchytarsus</i> sp.		
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i> sp.	
Ephemeroptera	Leptohyphidae	<i>Leptohyphes</i> sp.	
		<i>Tricorythodes</i> sp.	
	Baetidae	<i>Prebaetodes</i> sp.	
		<i>Baetodes</i> sp.	
		<i>Andesiops</i> sp.	
Diptera	Tipulidae	<i>Tipula</i> sp.1	
		<i>Tipula</i> sp.2	
		<i>Limonia</i> sp.	
		<i>Molophilus</i> sp.	
		<i>Hexatoma</i> sp.	
	Psychodidae	<i>Maruina</i> sp.	
		<i>Pericoma</i> sp.	
	Simulidae	<i>Simulium</i> sp.	
	Ceratopogonidae	<i>Atrichopogon</i> sp.1	
		<i>Atrichopogon</i> sp.2	
		<i>Alluaudomya</i> sp.	
	Tabanidae	<i>Haematopota</i> sp.	
	Empididae	<i>Chelifera</i> sp.	
	Chironomidae	Sbf. Chironominae	<i>Polypeditum</i> sp.
			<i>Endochironomus</i> sp.
Tanytarsini		Gen 1 pc	
		<i>Tanytarsus</i> s.p	
Sbf. Orthoclaadiinae	<i>Thienemanniella</i> s.p		

Continuación tabla 2.

	Chironomidae		<i>Lopescladius</i> s.p
			<i>Orthocladius</i> sp.1
			<i>Orthocladius</i> s.p.2
			<i>Orthocladius</i> s.p.3
			<i>Orthocladius</i> s.p.4
			<i>Orthocladius</i> s.p.5
			<i>Parametrioecnemus</i> s.p
			<i>Nanocladius</i> s.p p.c
			<i>Apsecrotanypus</i> s.p
		Sbf. Tanypodinae	<i>Apsecrotanypus</i> s.p
			<i>Krenopelopia</i> s.p
		Sbf. Podonominae	<i>Boreochlus</i> s.p p.c
			<i>Paraboreochlus</i> s.p p.c
	Blephariceridae	<i>Paltostoma</i> sp.	
Odonata	Aeshnidae	<i>Aeshna</i> sp.	
Trichoptera	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i> sp.	
	Odontoceridae	<i>Marilia</i> sp.	
	Hydrobiosidae	<i>Atopsyche</i> sp.	
	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i> sp.	
	Hydroptilidae	<i>Hydroptila</i> sp.	
	Leptoceridae	<i>Nectopsyche</i> sp.1	
		<i>Nectopsyche</i> sp.2	
	Helicopsychidae	<i>Helicopsyche</i> sp.	
	Polycentropodidae	<i>Polycentropus</i> sp.	
<i>Cymellus</i> sp.			

fue la estación ubicada en la desembocadura. En las estaciones 1 y 2 abundaron los organismos tipo desmenuzador, mientras que en la estación 3 abundaron los colectores. Los taxones más abundantes fueron el Amphipoda *Hyaella* sp. en las estaciones 1 y 2, y el efemeróptero *Prebaetodes* sp. en la estación 3 (Figura 2). Otros taxones comunes incluyen *Pryonociphon* sp., Plannaridae, en las estaciones 1 y 2; y el élmido *Heterelmis* sp. en la estación 3.

El índice de diversidad biológica de Shannon-Weiner ( $H'$ ) durante todo el estudio presentó un promedio de 2.14 bits/individuo con una desviación estándar de 0.51 y un coeficiente de variación (C.V) de 23.9%. El promedio de la diversidad de Shannon-Weiner ( $H'$ ) de las cinco replicas para cada estación vario de 1.50 bits/individuo en la estación 1 en septiembre del 2005, a 3.01 bits/individuo en la estación 3 en octubre del 2005 (Tabla 3). La dominancia varió de 0.07 bits/individuo en octubre del 2005 en la esta-

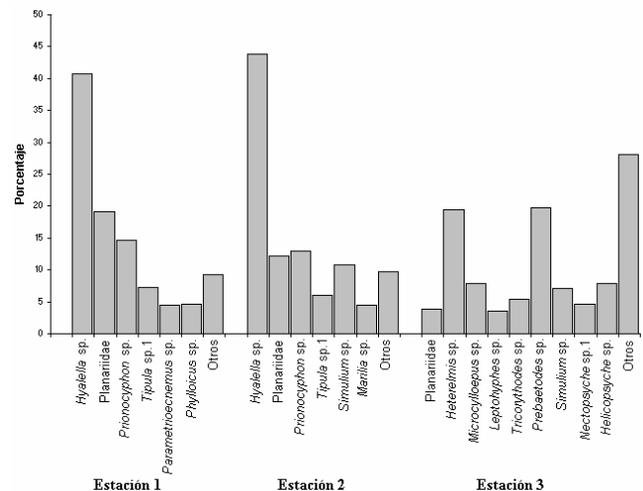


Figura 2. Abundancia relativa de los taxones de macroinvertebrados reportados para cada una de las estaciones de muestreo.

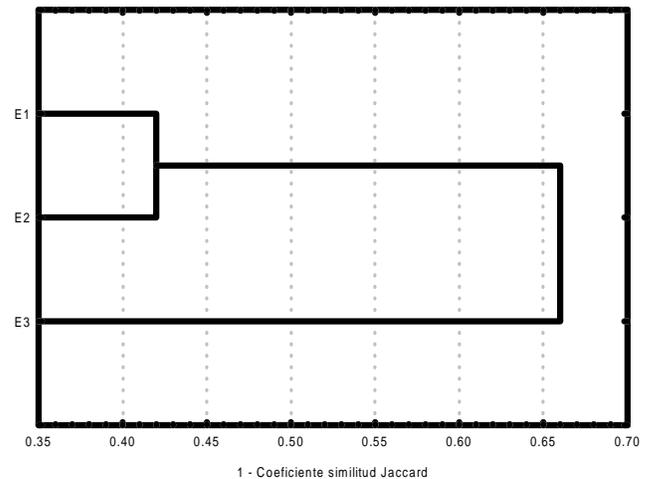
**Tabla 3.** Número de taxones (s), individuos (n), diversidad (H') y dominancia ( $\lambda$ ) de macroinvertebrados acuáticos.

Fecha	Variable	Estación		
		1	2	3
<b>Sep-05</b>	s	15	14	31
	n	276	174	322
	H'	1.50	1.73	2.63
	$\lambda$	0.37	0.32	0.13
<b>Oct-06</b>	s	16	11	32
	n	260	228	318
	H'	1.84	1.77	3.01
	$\lambda$	0.22	0.24	0.07
<b>Nov-05</b>	s	19	16	36
	n	315	290	559
	H'	1.99	1.80	2.81
	$\lambda$	0.19	0.25	0.08
<b>Ene-06</b>	s	13	14	36
	n	195	256	530
	H'	2.01	1.79	2.88
	$\lambda$	0.18	0.21	0.09
<b>Feb-06</b>	s	15	20	30
	n	227	267	627
	H'	1.73	1.89	2.74
	$\lambda$	0.26	0.26	0.09

ción 3, a 0.37 bits/individuo en la estación 1, en septiembre del 2005, y su promedio durante todo el estudio fue de 0.20 bits/individuo con una desviación estándar de 0.09 y un C.V de 45.9%. Los valores de similitud son mostrados en la Tabla 4. La mayor similitud se presentó entre las estaciones 1 y 2; y el menor valor fue entre las estaciones 1 y 3. En la Figura 3 se muestra el dendograma de disimilitud obtenido para las estaciones de muestreo.

### Discusión

Los 63 taxones de macroinvertebrados acuáticos encontrados en el nacimiento El Mortiño, muestran que este pequeño cuerpo de agua presenta una alta riqueza. en cuerpos de agua ubicados a una altitud similar como la Quebrada El Salado, el Río Vetas, en la subcuenca del Río Suratá; y la microcuenca del Río Jordán, en el Páramo de Berlín, **Gavilán et al.**, (2000) reportaron riquezas de 20, 13 y



**Figura 3.** Dendograma de disimilitud entre las estaciones de muestreo.

**Tabla 4.** Coeficiente de similitud (J) para las parejas de estaciones.

Estación	1	2	3
1	–	–	–
2	0.58	–	–
3	0.30	0.38	–

26 morfoespecies respectivamente. Los organismos colectados en el nacimiento El Mortiño son típicos de sistemas lóticos de aguas frías y poco intervenidos antrópicamente. Según **Roldán** (1992), en este tipo de ecosistemas es usual hallar representantes de los órdenes Trichoptera y Ephemeroptera. La presencia de los invertebrados encontrados denota buenas condiciones en la calidad del agua en las tres localidades.

Según **Roldán** (2001), los organismos del Orden Amphipoda están generalmente asociados a materia orgánica en descomposición, donde forman densas poblaciones, aunque también abundan con frecuencia en zonas donde se acumula material vegetal, como fue el caso para el presente estudio en las estaciones 1 y 2. De forma similar, **Posada et al.**, (2000) encontraron una abundancia significativa de estos microcrustáceos en la cuenca de la Quebrada Piedras Blancas, en aquellas estaciones donde se amontona hojarasca en cantidad. Respecto a la alta abundancia de ninfas de *Prebaetodes* sp. (Baetidae) en la estación 3, ésta puede estar influenciada por el mayor caudal y alta disponibilidad de oxígeno disuelto. La estación de la desembocadura ofrece una mayor cantidad y variedad de

hábitats para el desarrollo de macroinvertebrados acuáticos, lo cual probablemente haya favorecido la abundancia de especies y abundancia de organismos en comparación con las demás localidades evaluadas.

En las estaciones 1 y 2, el grupo funcional alimenticio más abundante fueron los desmenuzadores, los cuales se encargan de degradar la materia orgánica de partículas gruesas (> 1mm). Esto concuerda con **Gomi et al.**, (2002), quienes sugieren que en las cabeceras y nacimientos de ríos es común que abunden organismos desmenuzadores, debido a que estas zonas se encuentran altamente influenciadas por la vegetación riparia, que contribuye al aporte de material alóctono. En la estación de la desembocadura aumentó el porcentaje de colectores, lo cual se podría darse por el aumento de la materia orgánica de partículas finas que llegarían por arrastre.

Los valores del índice de diversidad de Shannon y del índice de dominancia registrados representan una diversidad media de acuerdo a los rangos propuestos por **Margalef** (1983), indicando que la comunidad no está siendo afectada por tensores ambientales diferentes a los de origen natural. La menor diversidad que se presentó en las estaciones de la zona alta y de la zona media puede deberse a que estas regiones presentan mayor cobertura vegetal y menor disponibilidad de luz que la estación de la desembocadura. Según **Vannote et al.**, (1980) estas características hacen que las comunidades que habitan los nacimientos de ríos presenten una diversidad relativamente baja al estar limitadas por un estrecho rango de temperatura.

La diferencia entre estas localidades con la estación desembocadura está dada además por una mayor diversidad de especies. **Bernal et al.**, (2006) encontraron en la Quebrada Paloblanco, un río de primer orden afluente del Otún, que la diversidad de macroinvertebrados aumentaba en el punto ubicado en la desembocadura. El incremento de la diversidad en la zona de la desembocadura estaría mediado por la mayor diversidad de hábitats que presenta esta zona, concordando con **Rice et al.**, (2001), quienes plantean que en las regiones de confluencia de los ríos la acumulación de sedimentos y material vegetal permite la formación de canales y pozos aumentando la diversidad de hábitats y de especies en estos sectores.

Los valores del coeficiente de similitud de Jaccard indican una alta variabilidad en la composición de especies entre las estaciones. **Downes et al.**, (2000) encontraron que los sitios de un mismo río pueden presentar una composición taxonómica de macroinvertebrados muy diferentes. Igualmente, **Heino et al.**, (2004) sugieren que la composición de macroinvertebrados en diferentes locaciones son

más variables en las pequeñas cabeceras de ríos que en los ríos de mayor orden. El mayor valor en el coeficiente de similitud que se presentó entre las estaciones 1 y 2 puede obedecer a la similitud de sustrato y cobertura de bosque, los cuales son factores importantes para los macroinvertebrados acuáticos como lo plantea **Hawkins et al.**, (1982). Las estaciones 1 y 3 presentaron el menor valor de similitud, lo cual puede deberse a que estas locaciones se encuentran bastante apartadas entre sí, y sus características físicas son diferentes.

Con base en los resultados hallados es posible asumir que el nacimiento El Mortiño es un sistema que ha sido poco alterado por las actividades antrópicas.

### Agradecimientos

Numerosas personas han colaborado para el desarrollo de esta investigación. Agradecemos al Laboratorio de Limnología de la UIS, por permitir llevar a cabo este estudio. A Solimary García, Fernán Lizandro Sanabria, Ricardo Prada y Néstor Cepeda, por su asistencia en el trabajo de campo. Adicionalmente, gracias a Faiber Caupaz y Libia Carolina González por su colaboración con la identificación de los organismos; e igualmente a Rodulfo Ospina por su atención prestada y el espacio dispuesto.

### Literatura citada

- Benda, L., Hassan, A., Church, M. & May, C.L.** 2005. Geomorphology of Steepland Headwaters: The Transition from Hillslopes to Channels. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **41**(4): 837-851.
- Bernal, E., García, G., Novoa, M.A. & Pinzón, A.** 2006. Caracterización de la comunidad de macroinvertebrados de la quebrada Paloblanco de la cuenca del río Otún (Risaralda, Colombia). *Acta Biol Colomb.* **11**(2): 45-59.
- Caicedo, O. & Palacios, J.** 1998. Los Macroinvertebrados Bénticos y la Contaminación Orgánica en la Quebrada La Mosca (Guarne, Antioquia, Colombia). *Actual Biol.* **20**(69): 61-73.
- Domínguez, E. & Fernández, H.** 2001. Guía para la determinación de los artrópodos bentónicos Sudamericanos. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Naturales. Instituto M. Lillo. Tucumán, Argentina. 282 pp.
- Downes B.J., Hindell J.S. & Bond N.R.** 2000. What's in a site? Variation in lotic macroinvertebrate density and diversity in a spatially replicated experiment. *Austral Ecology*, **25** (2): 128-139.
- Epler, J.H.** 2001. Identification Manual for the Larval Chironomidae (Diptera) of North and South Carolina. A guide to the taxonomy of the midges of the southeastern United States, including Florida. Special Publication SJ2001-SP13. North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Raleigh, NC, and St. Johns River Water Management District, Palatka, FL. 526 pp.

- Esteves, F.A.** 1988. Fundamentos de Limnología. Ed. Interciencias. FINEP. Rio de Janeiro, Brasil. 578 pp.
- Gavilán, R.A., Donato, J.C., Serrato, C., Cáceres, M.Y., Plata, Y. & Navarro G.** 2000. Las comunidades bentónicas y perifíticas como base para la evaluación de los sistemas hídricos lóticos del área de jurisdicción de la CDMB. 89 pp.
- Gomi, T., Sidle, R.C. & Richardson, J.S.** 2002. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems. *BioScience*, **52** (10): 905-916.
- Grubaugh, J.W., Wallace, V. & Houston, E.S.** 1997. Production of benthic macroinvertebrate communities along a Southern Appalachian River continuum. *Freshw Biol.* **37**(3): 581-596.
- Gutiérrez, J. D., Riss, W. & Ospina, R.** 2002. Bioindicación de la calidad del agua con lógica difusa Sugeno y macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Acta Biol Colomb.* **7**(2): 37-51.
- Gutiérrez, J. D., Riss, W. & Ospina, R.** 2006. Bioindicación de la calidad del agua en la sabana de Bogota – Colombia, mediante la utilización de la lógica difusa neuroadaptativa como herramienta. *Caldasia*, **28**(1): 45-56.
- Hawkins, C. P., Murphy M. L., & Anderson, N. H.** 1982. Effects of canopy, substrate composition, and gradient on the structure of macroinvertebrate communities in Cascade Range streams of Oregon. *Ecology*, **63**(6): 1840-1856.
- Heino, J., Louhi, P. & Muotka, T.** 2004. Identifying the scales of variability in stream macroinvertebrate abundance, functional composition and assemblage structure. *Freshw Biol.* **49**(9): 1230-1239.
- Machado, T.A.** 1989. Distribución ecológica e identificación de los coleópteros en diferentes pisos altitudinales del departamento de Antioquia. Tesis de grado. Universidad de Antioquia. Medellín. 324 pp.
- Margalef, R.** 1983. *Limnología*. Omega, Barcelona. 1010 pp.
- McCafferty, W.P.** 1981. *Aquatic Entomology*. Science Books International. Boston. 448 pp.
- Merritt, R.W., & Cummins, K.W.** 1996. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Third edition. Kendall/Hunt Publishing Company. Iowa. 862 pp.
- Muñoz-Quesada, F.** 1997. Manual de Trichoptera Neotropical: anotaciones y claves de las familias y géneros conocidos del Orden Trichoptera para Colombia. Departamento de Procesos Químicos y Biológicos. Universidad del Valle. Cali. 75 pp.
- Pennak, R.W.** 1989. *Freshwater invertebrates of United States*. Third edition. Wiley-Interscience, New York. 628 pp.
- Posada, J. & Roldán, G.** 2003. Clave ilustrada y diversidad de las larvas de Trichoptera en el noroccidente de Colombia. *Caldasia*, **21**(1): 169-192.
- Posada, J. A., Roldán G. & Ramírez, J. J.** 2000. Caracterización fisicoquímica y biológica de la calidad de aguas de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Rev. Biol. Trop.* **48** (1): 59-70.
- Rangel, O.** 2000. Clima en Colombia. Colombia Diversidad Biótica III La región de vida paramuna. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia- Instituto de Investigación en Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá. 902 pp.
- Rice, S.P., Greenwood, M.T. & Joyce, C.B.** 2001. Tributaries, sediment sources, and the longitudinal organisation of macroinvertebrate fauna along river systems. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **58**(4): 824-840.
- Riss, W., Ospina, R. & Gutiérrez, J. D.** 2002. Establecimiento de valores de bioindicación para los macroinvertebrados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Caldasia*, **24**(1): 135-156.
- Roldán, G.** 1988. Guía para el Estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Fondo FEN Colombia. COLCIENCIAS. Universidad de Antioquia. Medellín. 217 pp.
- \_\_\_\_\_. 1992. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Medellín: Universidad de Antioquia. Medellín. 529 pp.
- \_\_\_\_\_. 2001. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Propuesta para el uso del método BMWP/Col. Ciencia y Tecnología. Universidad de Antioquia. Medellín. 182 pp.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K. W., Sedell, J.R. & Cushing, J.** 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **37**: 130-137.
- Wade, K.R., Ormerod, J.J., & Gee, A.S.** 1989. Classification and ordination of macroinvertebrate assemblages to predict stream acidity in upland Wales. *Hydrobiologia*, **171**(1): 59-78.
- Wallace, J.B. & Webster, J.R.** 1996. The role of macroinvertebrates in stream ecosystem function. *Annu. Rev. Entomol.* **41**: 115-139.
- Wallace, J.B., Eggerton, S.L., Meyer, J.L. & Webster, J.R.** 1997. Multiple trophic levels of a forest stream linked to terrestrial litter inputs. *Science*, **277**: 102-104.
- Zúñiga, M. de C., Rojas, M. A. & Serrato, C.** 1994. Interrelación de indicadores ambientales de calidad en cuerpos de aguas superficiales del Valle del Cauca. *Rev. Col. Ent.* **20**(2): 124-130.

Recibido: noviembre 10 de 2006

Aceptado para su publicación: marzo 7 de 2008

# *OSTEOCEPHALUS PLANICEPS* COPE (AMPHIBIA: HYLIDAE): ITS DISTRIBUTION IN COLOMBIA AND SIGNIFICANCE

by

John D. Lynch<sup>1</sup>

## Resumen

**Lynch, J. D.:** *Osteocephalus planiceps* Cope (Amphibia: Hylidae): Its distribution in Colombia and significance. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(122): 87-91, 2008. ISSN 0370-3908.

Existen tres hipótesis biogeográficas que se aplican para los bosques de tierras bajas al oriente de los Andes colombianos y los datos de la distribución de *Osteocephalus planiceps* no coinciden. Existen otros datos para la distribución de una rana arborícola (*Hypsiboas hutchinsi*) que sí lo están para una pero no para las otras dos. Las tres hipótesis requieren estudios serios para determinar que al menos una es consistente con los datos que se obtienen en las bases de datos disponibles en los museos colombianos.

**Palabras clave:** Anuros, biogeografía, Cuenca Amazónica, evidencia.

## Abstract

Three biogeographic hypotheses are available for the forested lowlands of eastern Colombia and the distributional data for *Osteocephalus planiceps* are contrary to each hypothesis. The distributional data for another uncommon treefrog (*Hypsiboas hutchinsi*) are acceptable for one of the three hypotheses but not the other two. These biogeographic hypotheses require serious study to decide if any one of them is consistent with a rich database available in Colombian museums.

**Key words:** Amazonian basin, Anurans, biogeography, evidence.

<sup>1</sup> Grupo de Cladística profunda y biogeografía histórica, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico: jdlynch@unal.edu.co

The treefrog genus *Osteocephalus* is particularly diverse in Colombia (preserved Colombian vouchers are available in the amphibian collection of the Instituto de Ciencias Naturales for *O. buckleyi*, *O. cabrerai*, *O. carri*, *O. deridens*, *O. heyeri*, *O. mutabor*, *O. oophagus*, *O. planiceps*, *O. taurinus*, *O. verruciger*, and *O. yasuni*) and all known species are distributed east of the Andes (Acosta, 2000). Most of these are large frogs and apparently pass much of the year as residents of the canopy but descending to ground level to breed (personal observation and assumption). The species *O. planiceps* was described in the 19<sup>th</sup> century (Cope, 1874) and was relegated to the synonymy of *O. taurinus* by Trueb & Duellman (1971). During its century of recognition, it was but another name applied to hylid frogs from the Amazon Basin. Cochran & Goin (1970) did not include *O. planiceps* as part of the Colombian frog fauna.

Duellman & Mendelsohn (1995), based on study of material in northern Peru, drew conclusions sharply at odds with Trueb & Duellman (1971) and proposed that *O. planiceps* was one of the species found in the rainforests of Departamento Loreto in Peru. Duellman & Mendelsohn (1995) provided a partial diagnosis and distinguished *O. planiceps* from other species found in northern Amazonian Peru. The only report of *O. planiceps* from Colombia was by Lynch (2005) who included the name in the list of species collected in the forests some 7-15 kilometers north of the city of Leticia.

There are, at present, three competing proposals masquerading under the term biogeography for the rainforests of eastern Colombia. Hernández *et al.* (1992) proposed a series of biogeographic provinces and districts for the entire country. In terms of the forested eastern lowlands, they recognized two Provinces (La Guayana and La Amazonia-divided by the route of the Río Yarí and lower Río Caquetá) with six Districts south of the Río Guaviare (Fig. 1C). The proposal of Hernández *et al.* (1992) is hierarchical (districts are subdivisions of provinces). A very different proposal is that of Morrone (2000) whose treatment of southeastern Colombia included three subregions (Fig. 1B), whose boundaries do not correspond with any of the entities proposed by Hernández *et al.* (1992). In Morrone's proposal, there is a subregion associated with larger rivers (the floodplain [or inundated] forests) and southeastern Colombia is otherwise divided into a western fragment (Napan) and eastern fragment (Imerí) that join along the western edge of the Parque Nacional Chiribiquete. The third proposal is that of Fandiño & Wyngaarden (2005) who present a non-hierarchical proposal recognizing 63 chorological types; for lowland

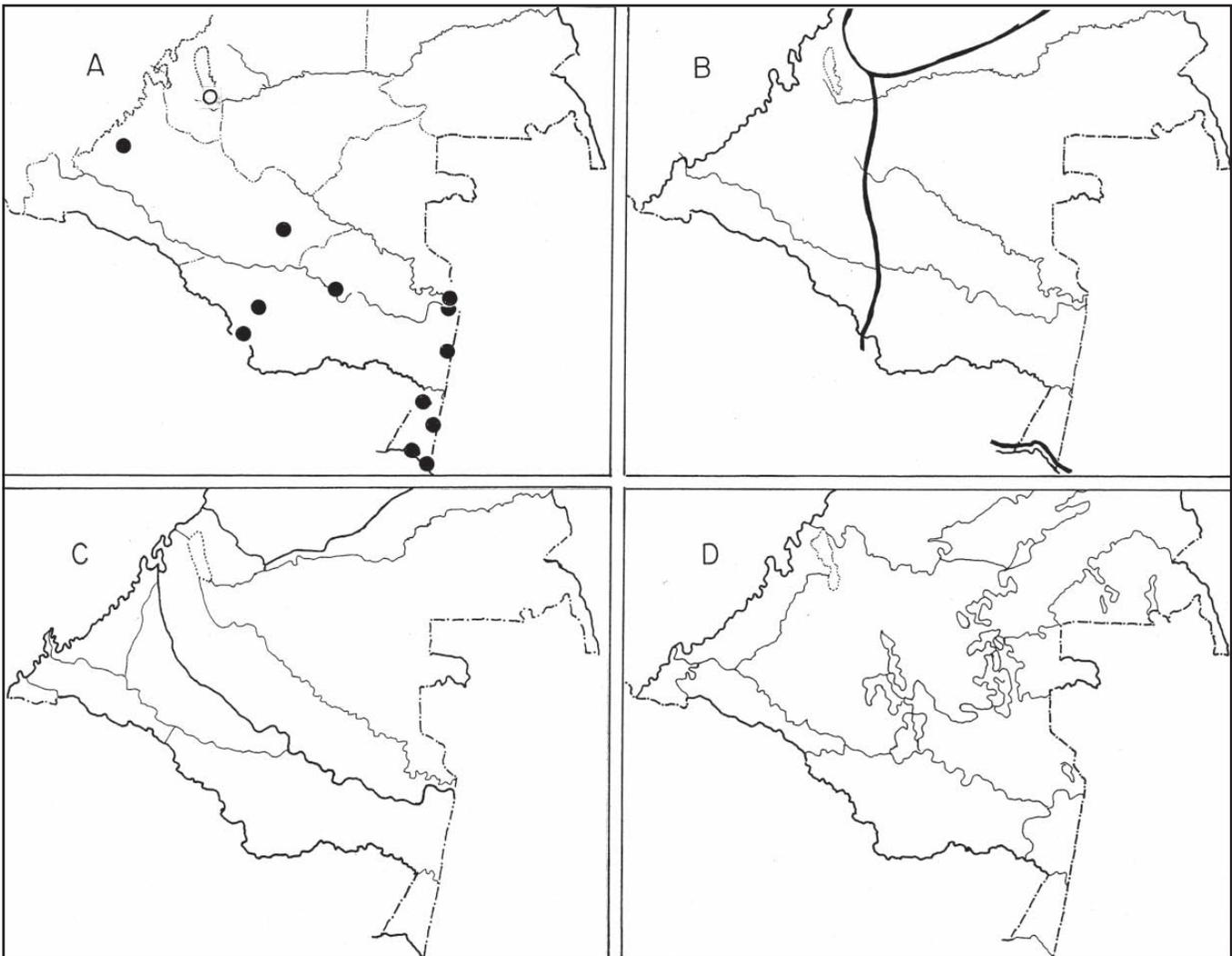
Colombia south of the Río Guaviare, there are 13 units (Fig. 1D). The chorological types of Fandiño & Wyngaarden (2005) bear considerable resemblance to the districts of Hernández *et al.* (1992) because each proposal makes abundant use of river courses in order to define boundaries and each treats political borders as something real. In contrast, the proposal of Morrone (2000) ignores political boundaries. Although the proposals of Hernández *et al.* (1992) and Morrone (2000) are each hierarchical, the hierarchical aspect of the proposal of Morrone is for regions outside of the focus of this article.

Of the three proposals, only that of Morrone (2000) makes any effort to include biological data in the form of distributions of organisms as part of a justification for a biogeographic entity. Morrone's methodology requires that the panbiogeographic track of at least one species conform to the limits of a biogeographic entity (in his case, a subregion). For the other two proposals, the areas were identified without recourse to biological data. In that case, one cannot help but wonder why the authors considered these units to be "biogeographical" (in the European tradition, the term is chorological).

With Platnick (1991), I would argue that recognition of some area in terms of biogeography requires at least a single coincidence. That coincidence is defined as a minimum of two biological distributions, each of which defines the same area. Morrone's (2000) reliance upon a single endemic species (endemic to one of his subregions) does not generate anything that might be recognized as a pattern.

Considering amphibian species, I know of no pair of species that conforms to any of Hernández *et al.* (1992) "biogeographic" districts or to Fandiño & Wyngaarden's (2005) chorological types (however, including reptiles as well, tc 62 [Isla Malpelo] can be sustained with evidence). These generally small districts or chorological types are perhaps appropriate for Andean species because, at least for amphibians, Andean distributions are small whereas in the lowlands, the distributions are much more extensive (Lynch & Duellman, 1997). Assuming that Morrone has at least one species' distribution that conforms to each of his subregions, the relevant question is: Are there more?

Borrowing a famous phrase, or quote, from Charles Darwin, concerning that evidence is either for or against a particular hypothesis (taken from a letter by Darwin to Asa Gray in 1857, Ghiselin, 1969), the data from biological distributions, imperfect though they may be, are pertinent to the acceptance or rejection of specific scientific proposals (curiously, also a quote from his less-famous co-discoverer of evolution, Alfred Wallace [see Brooks,



**Figure 1.** (A) Distribution of *Osteocephalus planiceps* in Colombia (solid symbols: voucher records housed in ICN; open symbol: record based on photograph). (B) biogeographic proposal of **Morrone** (2000); (C) biogeographic proposal of **Hernández et al.** (1992); (D) biogeographic proposal of **Fandiño & Wyngaarden** (2005).

1984: 10, quoting a letter from A. Wallace to Henry Bates, written 28 December 1845]).

### The distribution of *Osteocephalus planiceps* in Colombia

In the collections of the Instituto de Ciencias Naturales, there are preserved vouchers for *O. planiceps* from 11 localities in the Departamentos de Amazonas, Caquetá and Vaupés (Fig. 1A). The absence of vouchers from Depto. Putumayo is probably the result of the lack of serious inventory work in the lowlands of Putumayo when our focus is upon a frog species that normally occupies the canopy.

Beyond the documented vouchers, I have a photograph of *O. planiceps* from the southern edge of the Serranía de la Macarena in Depto. Meta.

The data for the distribution of *O. planiceps* do not support any of the three proposals (and are contrary to each proposal). Given that neither the **Hernández et al.** (1992) nor the **Fandiño & Wyngaarden** (2005) proposal has the minimum quantity of data to support any of their “biogeographical” entities, the negative data for *O. planiceps* assume greater importance. If the **Morrone** proposal has minimal data to support its three “biogeographical” subregions, a species with a wide-spread

distribution (*O. planiceps*) does not count as counter-evidence (Nelson & Platnick, 1981).

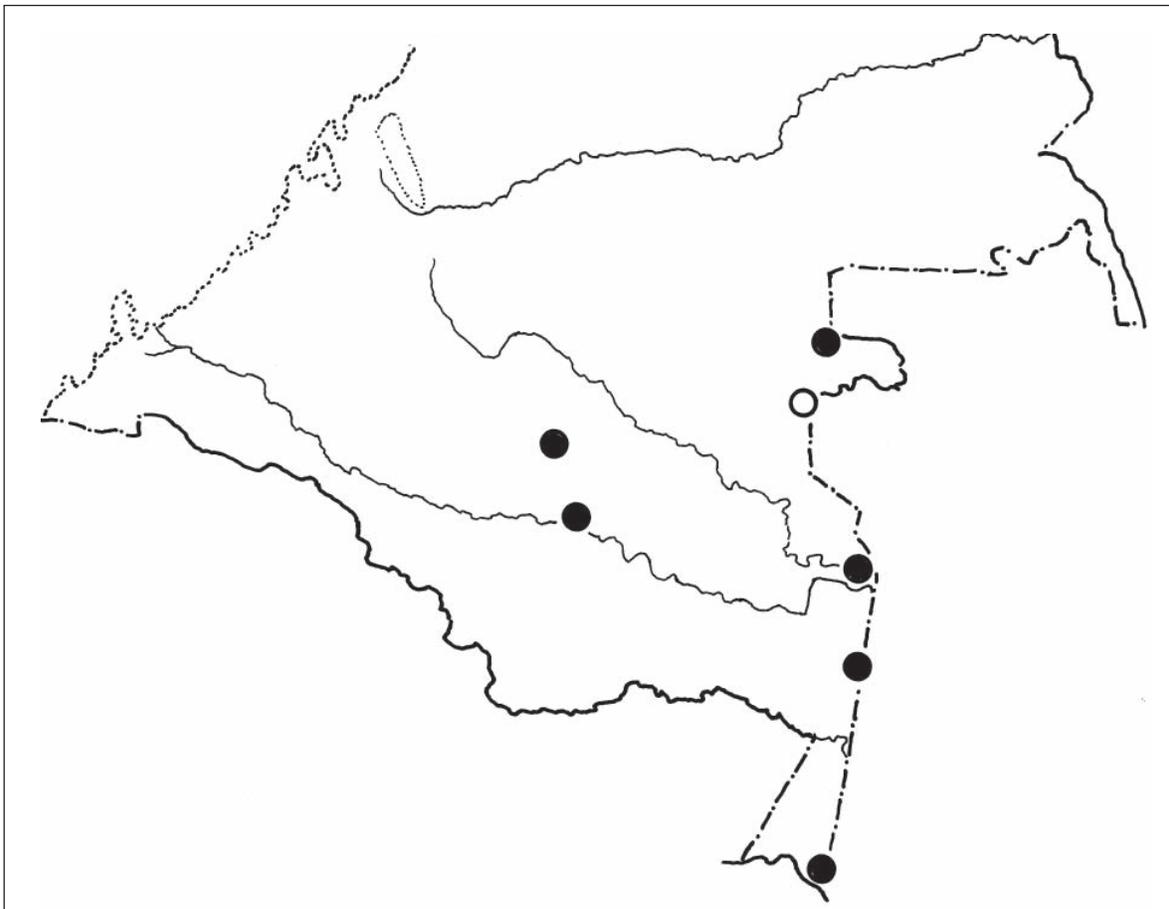
Another treefrog described from southeastern Colombia [*Hypsiboas hutchinsi* (Pyburn & Hall)] offers data (Fig. 2) that are consistent with Morrone's (2000) proposal and at the same time serve to reject the proposals of Hernández *et al.* (1992) and Fandiño & Wyngaarden (2005). *Hypsiboas hutchinsi* is known only from Colombia (Deptos. de Amazonas, Caquetá, and Vaupés) and adjacent Brasil. The southernmost records lie within the upland forests and do not include localities within the *varzea* (recognized as a different subregion by Morrone, 2000).

### Discussion

Given that few investigators have developed arguments pertinent to biogeographic hypotheses, the pertinence of

the data for *O. planiceps* remains ambiguous. As a first approximation, it is sufficient to raise serious doubts as to the degree to which any of these biogeographic hypotheses merits even tentative acceptance. The data for *Hypsiboas hutchinsi* are equally negative for the hypotheses of Hernández *et al.* (1992) and Fandiño & Wyngaarden (2005). These observations do not support (nor deny) the possibility that a robust hypothesis awaits articulation. What remains for the immediate future is to put each of these three hypotheses to as severe testing as available data permit.

The minimal data for the distribution of *O. planiceps* are fatal for the proposal of Morrone (2000) and for that of Hernández *et al.* (1992). Neither author (or set of authors) imagined that this species existed. *Hypsiboas hutchinsi* (Fig. 2) is acceptable to the proposal of Morrone (2000) but not for the provincial proposal of Hernández *et al.* (1992).



**Figure 2.** Known distribution of *Hypsiboas hutchinsi*. Open symbol (record of Pyburn & Hall, 1984). Solid symbols represent vouchers in the ICN.

We return to the, surely independent, assertions of A. Wallace (in **Brooks**, 1984) and C. Darwin (in **Ghiselin**, 1969) that, every fact (=species) is either for or against a particular hypothesis. Are the museum records of *Hypsiboas hutchinsi* and *Osteocephalus planiceps* sufficient to require re-thinking of biogeographic proposals? I think that the answer is yes. We still need to understand the pattern of organic distributions in eastern Colombia.

### Literature cited

- Acosta, A. R.** 2000. Ranas, salamandras y caecilias (Tetrapoda: Amphibia) de Colombia. *Biota Colombiana* **1**: 289-319.
- Brooks, J. L.** 1984. Just Before The Origen/ Alfred Russel Wallace's Theory of Evolution. Columbia University Press, New York. 284 pp.
- Cochran, D. M. & C. J. Goin.** 1970. Frogs of Colombia. United States National Museum Bulletin (288): 1-655.
- Cope, E. D.** 1874. On some Batrachia and Nematognathi brought from the upper Amazon by Prof. Orton. Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia **25**: 120-137.
- Duellman, W. E. & J. R. Mendelsohn III.** 1995. Amphibians and reptiles from northern Departamento Loreto, Peru: taxonomy and biogeography. The University of Kansas Science Bulletin **55**: 329-376.
- Fandiño Lozano, M. & W. van Wyngaarden.** 2005. Prioridades de Conservación Biológica para Colombia. Grupo ARCO, Bogotá. 188 pp.
- Ghiselin, M. T.** 1969. The Triumph of the Darwinian Method. University of California Press, Berkeley. 287 pp.
- Hernández Camacho, J. I., A. H. Guerra, R. O. Quijano & T. Walschburger.** 1992. Unidades biogeográficas de Colombia. Pp. 105-151, *En* G. Halffter (ed.) La Diversidad Biológica de Iberoamérica. Acta Zoológica Mexicana (n.s.). 389 pp.
- Lynch, J. D.** 2005. Discovery of the richest frog fauna in the world—an exploration of the forests to the north of Leticia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fís. Nat.* **29**: 581-588.
- Lynch, J. D. & W. E. Duellman.** 1997. Frogs of the Genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in Western Ecuador: Systematics, Ecology, and Biogeography. Natural History Museum, the University of Kansas, Special Publication (23): 1-236.
- Morrone, J. J.** 2000. A new regional biogeography of the Amazonian subregion, mainly based on animal taxa. *Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de Mexico, ser. Zoológica* **71** (2): 99-123.
- Nelson, G. & N. Platnick.** 1981. Systematics and Biogeography/ Cladistics and Vicariance. Columbia University Press, New York. 567 pp.
- Platnick, N. I.** 1991. On areas of endemism, 2 pp (unnumbered), *In* P. Y. Ladiges, C. J. Humphries & L. W. Martinelli. *Austral Biogeography. Australian Systematic Botany* **4**. CSIRO Press, Australia. 120 pp.
- Pyburn, W. F. & D. H. Hall.** 1984. A new stream-inhabiting treefrog (Anura: Hylidae) from southeastern Colombia. *Herpetologica* **40**: 366-372.
- Trueb, L. & W. E. Duellman.** 1971. A synopsis of Neotropical hylid frogs, genus *Osteocephalus*. Occasional Papers of the Museum of Natural History/ the University of Kansas/ Lawrence, Kansas (1): 1-47.

Recibido: julio 24 de 2007

Aceptado para su publicación: abril 18 de 2008

# LOWLAND REPTILES OF YACOPI (CUNDINAMARCA, COLOMBIA)

by

Rafael Ángel Moreno-Arias<sup>1</sup>, Guido Fabián Medina-Rangel<sup>2</sup>  
& Olga Victoria Castaño-Mora<sup>3</sup>

## Abstract

**Moreno-Arias, R.A., G.F. Medina-Rangel & O.V. Castaño-Mora:** Lowland reptiles of Yacopí (Cundinamarca, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **32**(122): 93-103, 2008. ISSN 0370-3908.

An inventory of reptiles that occur below 1000 m was conducted in Yacopí, Cundinamarca, Colombia. We recorded 47 species (26 lizards, 19 snakes, one amphisbaenian and one turtle). The richest family was Colubridae and the richest genus was *Norops*. Fauna was grouped according to its distribution as: trans-Andean species (those that occur the western side of the Cordillera Oriental) and widespread species (those that occur on both the western and eastern sides of the mountain range). Lizards dominate the first group and snakes the second. We found that 2000 m is the upper limit of distribution in Colombia for the reptiles reported herein.

**Key words:** Colombia, distribution, lowlands, reptiles, Yacopí.

## Resumen

Se efectuó un inventario de reptiles registrados por debajo de 1000 m en el municipio de Yacopí, Cundinamarca, Colombia. Se encontraron 47 especies (26 saurios, 19 serpientes, un anfisbénido y una tortuga). La familia más rica en especies fue Colubridae y el género más rico *Norops*. La fauna se agrupó según su distribución en dos tipos: Trasandino (al oeste de la cordillera Oriental) y Amplio (al este y oeste de la misma cordillera). Los saurios predominaron en el primero y las serpientes en el segundo. Se encontró que el límite superior de distribución en Colombia de la mayoría de reptiles registrados llega a los 2000 m.

**Palabras clave:** Colombia, distribución, reptiles, tierras bajas, Yacopí.

- <sup>1</sup> Grupo Biodiversidad y Conservación. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 55187. Correo electrónico: ramorenoa@unal.edu.co
- <sup>2</sup> Grupo Biodiversidad y Conservación. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 55187. Correo electrónico: gfmedina@unal.edu.co
- <sup>3</sup> Grupo Biodiversidad y Conservación. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 55187. Correo electrónico: olvicastano@yahoo.es

## Introduction

Yacopí has the largest primary and secondary tropical humid forests associations of the lowlands and mid-elevational zones in Cundinamarca. These remnants of the Carare-Opón Region are important potential areas for the conservation of the country's biodiversity (CAR, 2003). Nearly all investigations and conservation efforts have been focused on forest vegetation, whereas the fauna has been studied less, regardless of its ecological role in forest maintenance (Redford, 1997). Reptiles are important links in the food chain and important group for investigations of biological diversity.

There are few studies about reptilian diversity in Colombia (Pérez-Santos & Moreno, 1988; Sánchez *et al.* 1995; Campbell & Lamar, 2004; Ayala & Castro, unpublished) and even less for Yacopí. Except for the work in Guadualito-

Yacopí (Castaño *et al.* 1995) and others focused on the reproductive biology (Ramírez, 1999; Galeano, 2000; Ramírez-Pinilla *et al.* 2002) and diet (Caicedo, 2003) of the lizard *Mabuya mabouya*. We carried out an inventory of the reptiles in the lowlands of Yacopí based on our own fieldwork and review of material in collections.

## Materials and methods

Yacopí is located in northwestern Cundinamarca Department in the Magdalena Valley and its municipal center is at 05° 27' 58" N and 74° 20' 20" W (IGAC, 1996) (Figure 1). The monthly mean temperature is 21.2° C, with a variation in monthly means of 20.1-22.8° C.. The annual total precipitation is 2680.7 mm with a monthly mean precipitation of 223.4 mm. The dominant vegetation in Yacopí is humid tropical forest.

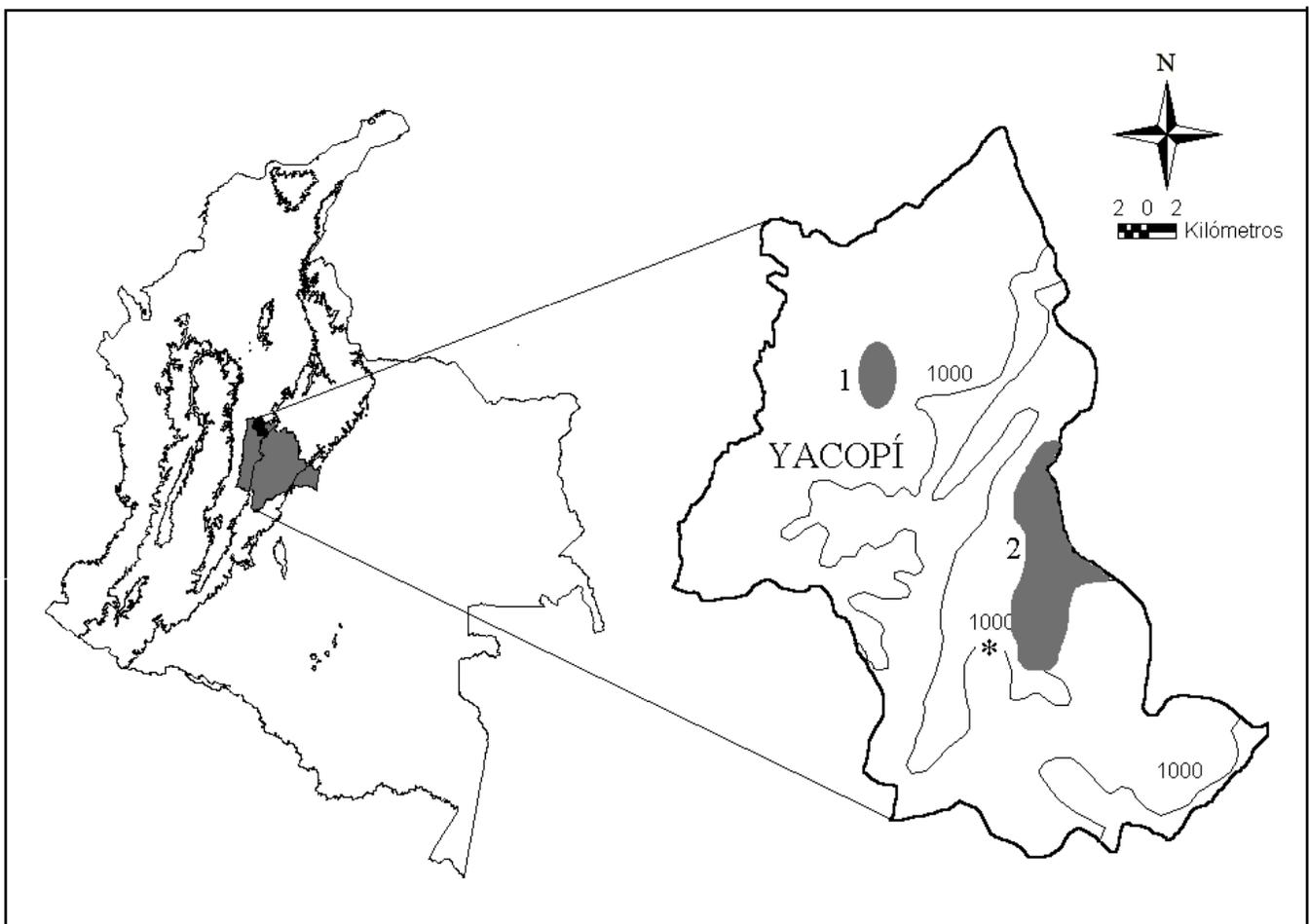


Figure 1. Map of study area ■ 1. Terán 2. Guadualito \* Municipality.

We obtained the information from the following sources: 1) field work in rural areas of Terán-Yacopí (05° 41' 55" N 74° 24' 08" W elevation 190-550 m. Figure 1) during December 2003 and January 2004 and adjacent areas of Guadualito-Yacopí (between 5° 33' 22.4" N to 5° 38' 00.1" N and 74° 17' 38.7" W to 74° 20' 2.9" W elevation 800-1500 m) October and November 1995. 2) Inspection of the reptile collections of the Instituto de Ciencias Naturales (ICN) and Museo de Historia Natural de la Universidad Industrial de Santander (UIS-R). We include species with at least one record (literature and/or collection) below 1000.

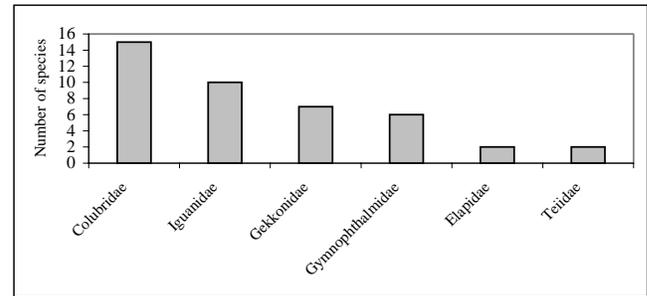
The key (Appendix 1) is based on diagnostic characteristics of mature specimens and previous keys (Peters & Orejas-Miranda, 1970; Peters & Barros-Donoso, 1970; Savage & Villa 1986; Pérez-Santos & Moreno, 1988; Avila-Pires, 1995; Roze, 1996; Campbell & Lamar, 2004; Ayala & Castro, unpublished).

The comparison between the fauna of Yacopí and those of other lowlands in Colombia (Perijá (Hernández-Ruz, 2001), Chocó biogeográfico (Castaño et al. 2004), Guainía (Vargas, 2000), Sierra Nevada of Santa Marta SNSM (Bernal-Carlo, 1991) and Meta (Lamar, 1987)) was made with: 1) Coefficient of Biogeographic Resemblance CBR (Duellman, 1990), 2) Shared Species between areas and 3) General species distribution in Colombia, inferred from collections and literature.

**Results**

At Yacopí we identified 47 species of reptiles: 26 lizards, 19 snakes, one amphisbaena and one turtle. Lizards are the richest with 55.3% of the species followed by snakes with 40.4%. (Figure 2). The families with the most species are Colubridae (Snakes) with 31.9% and Iguanidae (Lizards) with 21.3%. Gekkonidae (Lizards) has 14.9% and Gymnophthalmidae (Lizards) 12.8%. Five remaining families, with

one species each one, represent in total 10.6% of the species in Yacopí (Figure 3).

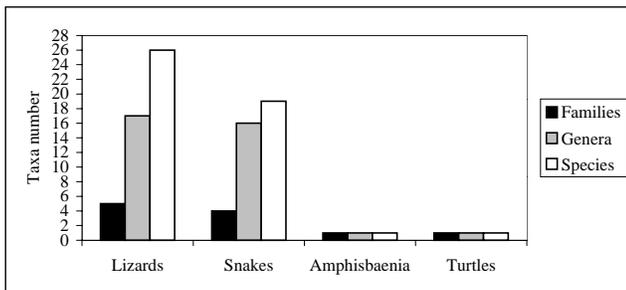


**Figure 3.** Richness of species by family reported in Yacopí.

The richest lizard genus is *Norops* with six species. *Lepidoblepharis*, *Leposoma* and *Sphaerodactylus* each have two species. For snakes *Dendrophidion*, *Liophis* and *Micrurus* each one with two species; the 27 remaining genera are each represented by one species.

According to the CBR, the areas most similar to Yacopí are SNSM (0.44), Perijá (0.42) and Chocó (0.36) and the least similar are Meta (0.24), La Ceiba, and Guainía (0.12). Yacopí shares the most species with Chocó (39), SNSM (27) and Meta (19) and the least number with Perijá (15) and Guainía (5).

According to the general distributions of species, the fauna at Yacopí includes species with two distributional patterns: species with a trans-Andean distribution and species with broad distributions. The first type includes 55.3% of the fauna found in Yacopí and the second includes the remaining fauna: 44.7 % (Tables 1 and 2). Among trans-Andean species the richest are lizards with 72.0%; for widespread species the richest are snakes 57.1% (Table 1).



**Figure 2.** Richness of families, genera and species reported in Yacopí.

**Table 1.** Number of species by distributional pattern of Yacopí.

Fauna type	Amphisbaenia	Turtles	Lizards	Snakes	Total
Trans-Andean	0	1	18	6	25
Broad	1	0	8	12	21
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>26</b>	<b>18</b>	<b>46</b>

With regard to the altitudinal distribution we found that 72.3% of the species occur from 0 to 2000 m, 17.1% below 1000 m and only the 10.6% reached an elevation of 2700 m (Table 3).

**Table 2.** Faunal types based in the species distribution.

		Distribution	Species
Trans-Andean	1	Cauca and Magdalena valleys and Chocó.	<i>Chironius grandisquamis</i> , <i>Echinosaura horrida</i> , <i>Lepidoblepharis intermedius</i> , <i>Leposoma southi</i> , <i>Polychrus gutturossus</i> , <i>Pseustes schropshirei</i>
	2	Cauca and Magdalena valleys, Northern Chocó.	<i>Anolis frenatus</i> , <i>Norops vittigerus</i> , <i>Lepidoblepharis xanthostigma</i> , <i>Ptychoglossus festae</i> , <i>Sphaerodactylus lineolatus</i>
	3	Interandean valleys, Chocó and Caribe region.	<i>Ameiva festiva</i> , <i>Dendrophidion percarinatus</i> , <i>Micrurus dumerilli</i> , <i>Stenorrhina degenhardtii</i>
	4	Cauca and Magdalena valleys and Caribe region without arid zone of La Guajira.	<i>Basiliscus galeritus</i> , <i>Dendrophidion bivittatus</i> <i>Kinosternon leucostomum</i>
	5	Interandean valleys y Caribe region.	<i>Norops tropidogaster</i> , <i>Bachia bicolor</i> , <i>Tretioscincus bifasciatus</i>
	6	Cauca and Magdalena valleys.	<i>Norops mariarum</i> , <i>Anolis tolimensis</i>
	7	Magdalena valley.	<i>Norops sulcifrons</i>
	8	Magdalena valley and north of Department of Magdalena.	<i>Sphaerodactylus heliconiae</i>
Broad	1	Colombian lowlands.	<i>Amphisbaena fuliginosa</i> . <i>Boa constrictor</i> , <i>Cnemidophorus lemniscatus</i> , <i>Iguana iguana</i> , <i>Imantodes cenchoa</i> , <i>Leptophis ahaetulla</i> , <i>Mabuaya sp.</i> , <i>Mastigodryas boddaerti</i> , <i>Oxybelis aeneus</i> , <i>Spilotes pullatus</i> , <i>Tantilla melanocephala</i> , <i>Thecadactylus rapicauda</i>
	2	Interandean valleys, Caribe region, "pedemonte llanero" and adjacent lowlands.	<i>Gonatodes albugularis</i> , <i>Hemidactylus brookii</i> , <i>Leposoma rugiceps</i> , <i>Liophis epinephelus</i> <i>Micrurus mipartitus</i>
	3	Interandean valleys, Caribe region and north of "pedemonte llanero".	<i>Bothrops aper</i> , <i>Leptodeira septentrionalis</i>
	4	Interandean valleys, Caribe region and Orinoquia.	<i>Norops auratus</i> , <i>Liophis melanotus</i>

## Discussion

The reptiles reported represent 9.4% of Colombian species, 23.8% of the genera and 46.4% of the families. Snakes are the richest in Colombia in contrast with Yacopí where lizards are the richest. In Yacopí, Colubridae and Iguanidae are the richest families and *Norops* the richest genus, which is similar to that reported for all of Colombia (Sánchez *et al.* 1995, Castaño *et al.* 2004) (Figure 2 and 3). We found new distributional data in Magdalena valley for *Sphaerodactylus heliconiae* and *S. lineolatus* known only in northern Caribbean region and *Lepidoblepharis intermedius* and *Leposoma southi* registered for western Colombia in Cauca, Chocó and Valle del Cauca.

The chochoan fauna most resembles that in Yacopí because eleven species are distributed in the Chocó and in the Cauca and Magdalena valleys (Table 3). This tendency also is evident in the 39 shared species and 16 exclusive ones between Yacopí and Chocó. However the CBR value

between these areas is affected by the greater number of species in the Chocó that increases the denominator of the factor and diminishes the similarity with Yacopí. The value of the CBR obtained between Yacopí and SNSM is significant but it doesn't represent a true faunistic similarity, because many of the shared species of these two regions also are shared with Chocó and because they only include one exclusive species. The CBR value represents the similarity given by the relatively similar total richness between the areas.

**Table 3.** Altitudinal distribution and species number of reported reptiles.

Altitudinal distribution	Amphisbaenia	Testudinata	Sauria	Serpentes	Total
0-1000 meters	0	0	6	2	8
0-2000 meters	1	1	18	14	34
0-2700 meters	0	0	2	3	5

Lizards are the dominant reptiles in the trans-Andean distribution pattern and they are twice the number of snake species (Tables 1 and 2). This result is because of *Norops*, *Sphaerodactylinae* and *Gymnophthalmidae* which have a high diversity and broad distribution in Central America and northern of South America. These taxa constitute 72.0% of the trans-Andean species and 83.3% of the trans-Andean lizards, which shows a high influence of the autochthonous fauna of Central America and northern South America that was possibly generated by Pliocene events that united and separated these continents allowing the exchange (Duellman, 1979; Estes & Báez, 1985) and faunal diversification among them (Cadle, 1985).

Snakes are most numerous in the broad distribution pattern (Tables 1 and 2). Fifteen of 18 species are part of the Colubridae family (including *Atractus* sp.) (Figure 3). This result is coherent with the Colubridae richness in the Neotropical snakes assemblages (Cadle, 1984a, b, c, 1985). In the study area, this family is composed of ten Colubridae of broad distribution, three Central American Xenodontines and two South American Xenodontines reflecting a tendency in the richness of these three lineages that agree with that suggested by Cadle (1985) and Cadle & Greene (1993) for the Chocó and inter-Andean valleys region in Colombia. The above-mentioned trend contrasts with the lizards.

The higher number of species between 0-2000 m (Table 3) could be an example of the proposal by Heatwole & Sexton (1966) and Scott (1976) that the highest species diversity exist in intermediate elevations (500-1800 m) because the high primary production allows major vegetation structural complexity to support more species than other altitudinal ranges with less complex structures. Another factor that might explain the differences in richness between altitudinal ranges is thermoregulation because it prevents reptiles to extend to higher altitudes where solar radiation is less available (Navas, 1999).

### Acknowledgements

We thank the Corporación Autónoma Regional-Cundinamarca CAR and Universidad Nacional de Colombia No 20201003228 for the partial financing of this work and the Instituto de Ciencias Naturales for the access to the lab and equipment. To Orlando Rangel-Ch for his support. We are grateful to John Lynch (ICN), Martha Patricia Ramírez (UIS-R), Hno Roque Casallas and Arturo Rodríguez (MLS) for access to collections under their care and to Vivián Páez (MHUA) and Fernando Castro (UVC) for information concerning their collections. Emil Hernández helped us obtain information from the IAvH. To Rancés

Caicedo and Jesús Ortega for their hospitality and help in the attainment of information in Bucaramanga. To Harol Sánchez for his help in the field. William Duellman and Gladys Cárdenas for the suggestions to the final manuscript. Natalia Gallego for her help in the translating the manuscript. Finally, we thank the Hincapié family for their hospitality in Terán.

### References

- Avila-Pires, T. 1995. Lizards of Brazilian Amazonia (Reptilia: Squamata). Zoologische Verhandelingen. The Nationaal Natuurhistorisch Museum, Leiden. 706 pp.
- Ayala, A & F, Castro. Unpublished. Saurios de Colombia-Lizards of Colombia.
- Bernal-Carlo, A. 1991. Herpetology of Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: A Biogeographical Analysis. Unpublished PhD Dissertation. City University of New York. 325 pp.
- Cadle, J. E. 1984a. Molecular Systematics of Neotropical Xenodontine Snakes III. Overview of Xenodontine Phylogeny and the History of New World Snakes. *Copeia* 1984: 641-652.
- . 1984b. Molecular Systematics of Neotropical Xenodontine Snakes II. Central American Xenodontines. *Herpetologica* 40: 21-30.
- . 1984c. Molecular Systematics of Neotropical Xenodontine Snakes I. South American Xenodontines. *Herpetologica* 40: 8-20.
- . 1985. The Neotropical Colubrid Snake Fauna (Serpentes: Colubridae): Lineage Components and Biogeography. *Systematic Zoology* 34: 1-20.
- . & H. W. Greene. 1993. Phylogenetic Patterns, Biogeography, and the Ecological Structure of Neotropical Snake Assemblages, pp 281-293. En Ricklefs, R.E & D. Schluter (eds.) *Species Diversity in Ecological Communities*. The University of Chicago Press. Chicago.
- Caicedo, R. 2003. Dieta en una población de *Mabuya mabouya* (Sauria: Scincidae) de Yacopí, Cundinamarca. Tesis de Pregrado. Escuela de Biología, Universidad Industrial de Santander. Colombia. 93 pp.
- Campbell, J & W, Lamar. 2004. The Venomous Reptiles of the Western Hemisphere. Comstock Publishing Associates a Division of Cornell University Press. Ithaca and London. 870 pp.
- CAR 2003. Plan de acción trianual 2001-2003. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. 160 pp.
- Castañón-Mora, O. V., P.A. Galvis & J.F. Álvarez. 1995. Informe final: "Evaluación preliminar de ecosistemas en la región del Magdalena Medio, Área Reptiles". Convenio UN-IDEAM No. 11-0109-0-95-95. Inédito.
- Castañón-Mora, O. V., G. Cárdenas., E. Hernández & F. Castro. 2004. Reptiles en el Chocó Biogeográfico, pp 599-632. En Rangel-Ch, O (ed.) Colombia. *Diversidad Biótica IV. El Chocó Biogeográfico/Costa Pacífica*. UNIBIBLOS. Bogotá D.C.
- Duellman, W. E. 1990. Herpetofaunas Neotropical Rainforest: Comparative composition history, and resource use, pp. 455-

- 505, En Gentry, A. H(ed) Four Neotropical Rainforest. Yale University Press. New Haven, CT, USA.
- Duellman, W. E.** 1979. A South American Herpetofauna: A Panoramic View, pp 1-28, En Duellman, W. E (ed) The South American Herpetofauna: Its Origin, Evolution, and Dispersal. Museum of Natural History University of Kansas. Lawrence.
- Estes, R. & A. Báez.** 1985. Herpetofauna of North and South America during the late Cretaceous and Cenozoic: evidence of interchange?, pp139-197, En Stchli, F.G & S. D. Webb (eds.)The Great American Biotic Interchange. Plenum press.
- Galeano, J. C.** 2000. Actividad Reproductiva del Lagarto Vivíparo *Mabuya mabouya* (Sauria: Scincidae) en la Localidad de Guadualito Municipio de Yacopí, Cundinamarca. Tesis de Pregrado. Escuela de Biología, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Harris, D.M.** 1982. The *Sphaerodactylus* (Sauria: Gekkonidae) of South America. Occasional Papers of Museum of Zoology, University of Michigan **704**: 1-31.
- Heatwole, H. & O.J. Sexton.** 1966. Herpetofaunal Comparisons Between Two Climatic zones in Panama. American Midland Naturalist **75**: 45-60.
- Hernández-Ruz, E., O.V, Castaño-Mora., G. Cárdenas-Arévalo & P. A. Galvis-Peñuela.** 2001. Caracterización Preliminar de la "Comunidad" de Reptiles de un sector en la Serranía del Perijá. *Caldasia* **23**: 475-490.
- IGAC.** 1996. Diccionario Geográfico de Colombia. Tomo 4. Tercera edición. Horizonte Impresores LTDA. 2521 pp.
- Lamar, W. W.** 1987. A Biogeographical Analysis of the Reptiles of Western Meta, Colombia. M. Sc. Dissertation. University of Texas at Arlington. USA.152 pp.
- Navas, C.A.** 1999. Biodiversidad de Anfibios y Reptiles en el Páramos: Una visión Eco-fisiológica. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales **23**: 265-474.
- Pérez-Santos, C. & A. G. Moreno.** 1988. *Ofidios de Colombia*. Monografía VI. Museo Regionale di Scienze Naturali Torino. 517 pp.
- Peters, J.A. & R. Donoso-Barros.** 1970. Catalogue of the Neotropical Squamata Part II. Lizards and Amphisbaenians. Smithsonian Institution Press. 293 pp.
- . and **B. Orejas-Miranda.** 1970. Catalogue of the Neotropical Squamata Part I. Snakes. Smithsonian Institution Press. 347 pp.
- Ramírez-Pinilla, M. P.** 1999. Biología Reproductiva en *Mabuya mabouya* (Reptilia, Sauria, Scincidae). Características Básicas del Patrón Reproductivo, Informe final. Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología. 40 pp.
- ., **V. H. Serrano & J. C. Galeano.** 2002. Annual Reproductive cycle of *Mabuya mabouya* (Squamata, Scincidae). *Journal of Herpetology* **36**: 667-677.
- Redford, K. H.** 1997. A Floresta Vazia, pp 1-22, En Valladares-Padua, C., R. E. Bodmer & L. Cullen Jr (eds.) Manejo e Conservação de Vida Silvestre no Brasil. Sociedade Civil Mamirauá. Belen, PA.
- Roze, J.A.** 1996. Coral Snakes of the Americas: Biology, Identification, and Venoms. Krieger Publishing Company. 328 pp.
- Sánchez-C, H., O. Castaño-M. & G. Cárdenas-A.** 1995. Diversidad de los Reptiles en Colombia, pp. 277-325, En Rangel-Ch, O (ed.) Colombia, Diversidad Biótica I. Editorial Guadalupe.
- Savage, J. & J. Villa.** 1986. Herpetofauna de Costa Rica. Society for the Study of Amphibians and Reptiles. 207 pp.
- Scott, N.J.** 1976. The Abundance and Diversity of the Herpetofauna of Tropical Forest Litter. *Biotropica* **8**: 41-58.
- Vargas, M.** 2000. Estudio preliminar de la Herpetofauna de "La Ceiba" (Río Inírida, Inírida, Guainía, Colombia). Trabajo de Grado. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. 192 pp.

Recibido: mayo 4 de 2007

Aceptado para su publicación: abril 29 de 2008

**Appendix 1. Identification key of lowlands reptiles of Yacopí**

- 1. Body with shell ..... *Kinosternon leucostomum*
- 1' Body without shell ..... 2
- 2. Limbs present ..... 3
- 2' Limbs absent ..... 28
- 3. Posterior limbs rudimentary, anterior limbs small with four digits; without ear opening ..... *Bachia bicolor*
- 3' Well developed limbs and digits, with ear opening ... 4
- 4. Dorsals and head scales granular, equal in size; mobile eyelid absent ..... 5
- 4' Dorsals and head scales not granular of different sizes, eyelid present ..... 11
- 5. Enlarged subdigital lamellae; vertically elliptic pupil .. 6
- 5' No enlarged subdigital lamellae; round pupil ..... 7
- 6. Claws within dermal sheath; subdigital lamellae extend to distal part of the finger .....  
..... *Thecadactylus rapicauda*
- 6' Claws not with dermal sheath, subdigital lamellae extend only to penultimate phalange .....  
..... *Hemidactylus brookii*
- 7. Supraocular spine or at least an enlarged superciliary scale present ..... 8
- 7' Neither supraocular spine or enlarged superciliary scale present ..... *Gonatodes albogularis*
- 8. Asymmetric fingers termination with a subdigital round and extensive scale distally; claws covered by a series of asymmetric scales ..... 9
- 8' Symmetric fingers termination without a subdigital round and extensive scale distally, claws covered by a series of symmetric scales ..... 10
- 9. Two supranasals; subcaudals enlarged; males with orange head (**Harris**, 1982) .....  
..... *Sphaerodactylus heliconiae*
- 9' One supranasal; subcaudals not enlarged; adults with a vermiculated pattern (**Harris**, 1982) .....  
..... *Sphaerodactylus lineolatus*
- 10. With 11-13 subdigital lamellae on fourth toe .....  
..... *Lepidoblepharis xanthostigma*
- 10' with 17 subdigital lamellae on fourth toe .....  
..... *Lepidoblepharis intermedius*
- 11. Dorsal and ventral scales cicloidal ..... 12
- 11' Dorsal and ventral scales not cicloidal ..... 13
- 12. Cicloidal mental shields; first finger not reduced .....  
..... *Mabuya sp*
- 12' Non-cicloidal mental shields; first finger reduced ....  
..... *Tretioscincus bifasciatus*
- 13. Tongue bifid; cephalic scales large, polygonal, arranged symmetrically ..... 14
- 13' Tongue not bifid; cephalic scales small or medium, irregular, arranged asymmetrically ..... 19
- 14. Granular dorsal scales ..... 15
- 14' Non-granular dorsal scales or if granular mixed with tubercles ..... 16
- 15. Basal tongue fold present, males without spurs laterally on the base of tail; 142-149 scales around middle of body ..... *Ameiva festiva*
- 15' Without tongue fold; males with spurs laterally at base of tail; 112-119 scales around middle of body .....  
..... *Cnemidophorus lemniscatus*
- 16. Dorsal scales polygonal and homogeneous ..... 17
- 16' Dorsal scales mixed with tubercles .....  
..... *Echinosaura horrida*
- 17. Scales on forearms smooth ..... *Ptychoglossus festae*
- 17' Scales on forearms keeled ..... 18
- 18. Two frontonasals, scales of the sides of neck granular and juxtaposed, dorsal scales oval acute or mucronate .....  
..... *Leposoma southi*
- 18' One frontonasal, scales of the sides of the neck keeled and overlapping; dorsal scales rectangular acute or mucronate .....  
..... *Leposoma rugiceps*
- 19. Subdigital lamellae enlarged; fingers not cylindrical or laterally compressed ..... 23
- 19' Subdigital lamellae not enlarged; fingers cylindrical or laterally compressed ..... 20

20. Rounded occipital crest (small in juvenile and females)  
..... *Basiliscus galeritus*
- 20' Without occipital crest as rounded fin ..... 21
21. Large rounded scale below ear opening .....  
..... *Iguana iguana*
- 21' Without large rounded scale below ear opening ..... 22
22. Tail prehensile; 40 subdigital lamellae on second and in third phalange of fourth toe; males with inconspicuous dewlap; ventral scales three times keeled; femoral pores present ..... *Polychrus gutturossus*
- 22' Tail not prehensile; 14 subdigital lamellae on second and in third phalange of fourth toe; males with conspicuous dewlap (dark blue with cream scales); ventral scales keeled unicarinate; femoral pores absent ..... *Norops auratus*
23. Paravertebral scales keeled and larger than granular scales laterally; ventrals keeled; male dewlap red blackish scales ..... *Norops tropidogaster*
- 23' Dorsal scales approximately same form and size flat or keeled; ventral flat or keeled. Male dewlap with another color and pattern ..... 24
24. With 19 or more enlarged subdigital lamellae in the fourth toe between the second and third phalange ..... 25
- 24' Less than 19 enlarged subdigital lamellae in the fourth toe between the second and third phalange ..... 26
25. Caudal crest present; 19 at 21 enlarged subdigital lamellae in the fourth toe between the second and third phalange, male dewlap red with six to nine arrays cream color and four black points among each array .....  
..... *Norops sulcifrons*
- 25' Caudal crest absent; 26 at 28 enlarged subdigital lamellae in the fourth toe between the second and third phalange; Dewlap cream with arrays of white scales .....  
..... *Anolis frenatus*
26. Suboculars separated from labials superiors for two scales rows, 11 scales among second canthals, six supralabials; seven loreals; supraorbital semicircles separated by one scale, ventral scales keeled and romboids; 18 enlarged subdigital lamellae in fourth finger toe between the second and third phalange. Dewlap red in females cream, with white scales and a dark big rounded stain in the center .....  
..... *Norops vittigerus*
- 26' Suboculars separated from labials superiors for one scale row; 10 intercanthals. More than six supralabials; five to six loreals; supraorbitals semicircles separated by two or more scales; less than 18 enlarged subdigital lamellae in the fourth finger toe between the second and third phalange. Dewlap without dark big stain in the center ..... 27
27. With 17 enlarged subdigital lamellae in the fourth toe between the second and third phalange; 8 to 9 supralabials; semicircles separate supraorbitals among them for three scales and of the parietal ones for three to four scales; hemipenis without distal bifurcation. Dewlap red-orange anterior and gray to pink in the two later thirds ..... *Norops tolimensis*
- 27' With 15 enlarged subdigital lamellae in the fourth toe among the second and third phalange, 7 supralabials; semicircles separate supraorbitals among them for two scales and of the parietal ones for two to three scales; hemipenis with distal bifurcation; Dewlap red-orange with eight arrays of lengthened scales of cream color, with numerous granular scales cream densely agrouped. .... *Norops mariarum*
28. (2') Rectangular scales forming traverse rings; eye under an opaque scale. Ventral scales of same size as dorsals and separated of them by a lateral row; head doesn't differ almost of the tail ..... *Amphisbaena fuliginosa*
- 28' Rectangular scales without forming traverse rings; eye under a transparent scale; Ventral scales clearly different from the dorsals; Tail clearly different from the head ..... 29
29. Loreal pit present; solenoglyphus; head scales head and dorsum strongly keeled ..... *Bothrops asper*
- 29' Loreal pit absent; aglyphus, proteroglyphus or opistoglyphus; head scales smooth and of the dorsum smooth or keeled ..... 30
30. Head scales small; more of 30 dorsal rows; rams pelvic present in male and little developed in females .....  
..... *Boa constrictor*
- 30' Head scales as plates; less than 30 dorsal rows; pelvic rams absent in both sexes ..... 31
31. Body design in complete rings; proteroglyphus; eye little as a point; loreal scale absent ..... 32
- 31' Body design different to the previous one; aglyphus or opistoglyphus; medium eye to big; loreal scale present or absent ..... 33

32. Body and tail desing in three colors (red, black and yellow or white); black and white head; preanals tubercles present in males ..... *Micrurus dumerilli*
- 32' Body design in two colors (black and white); black head with a red ring; without tubers preanales .....  
.....*Micrurus mipartitus*
33. With 10 dorsal rowswith reduction to 8 toward the later part; paravertebrales scales with prominent keel ..... *Chironius grandisquamis*
- 33' More than 10 dorsal rows with or without reduction; paravertebrales scales without prominent keel ..... 34
34. Dorsal rows without reduction ..... 35
- 34' Dorsal rows with reduction ..... 38
35. Nasal scale fused with the internasal .....  
.....*Stenorrhina degenhardtii*
- 35' Nasal scale not fused with the internasal ..... 36
36. Vertical elliptic pupil; enlarged vertebral row; head and eyes very prominent .....*Imantodes cenchoa*
- 36' Round pupil; vertebral row not enlarged; head and eyes non prominent ..... 37
37. With dorsal arrangement 17-17-17 ; anal whole; 130 ventrals .....*Atractus* sp
- 37' With dorsal arrangement 15-15-15 ; anal divided; more than 154 ventrals ..... *Tantilla melanocephala*
38. Dorsal scales smooth ..... 39
- 38' Dorsal scales keeled ..... 43
39. Loreal absent; lengthened snout; with dorsal arrangement in 17-17-13 rows ..... *Oxybelis aeneus*
- 39' Loreal present; normal snout; dorsal arrangement different to 17-17-13 ..... 40
40. Dorsals in 21-21-16 rows, supralabials nine .....  
..... *Leptodeira septentrionalis*
- 40' Dorsals in 17-17-15 row, supralabials nine or less ..... 41
41. Two previous temporals; one postnasal; first infralabials in contact behind the mental one. Dorsum blue-grayish with a pale longitudinal line each side fourth and fifth scale (**Pérez-Santos and Moreno**, 1988) ....  
..... *Mastigodryas boddaertii*
- 41' One previous temporal; without postnasal; first infralabials not in contact behind the mental one ..... 42
42. Two apical pit; 132 ventrals; alone lateral dark band from the later half of the body and tail .....  
..... *Liophis epinephelus*
- 42' Without apical pits; 151 ventrals; lateral dark band after the head and along the whole body and tail ....  
..... *Liophis melanotus*
43. Loreal absent; dorsals in 15-11 rows .....  
..... *Leptophis ahaetulla*
- 43' Loreal present; dorsals rows different to 15-11 ..... 44
44. First infralabials separated behind the mental one .... 45
- 44' First infralabials in contact behind the mental one ..  
..... 46
45. Fifth supralabial in triangular form; 18-10 dorsals rows. Dorsum with yellow-black oblique bandes, venter yellow with black spots (**Pérez-Santos and Moreno**, 1988) .....*Spilotes pullatus*
- 45' Fifth non triangular supralabial; 21-15 dorsal rows. Dorsum brown with yellow oblique bands, dorsal scales around blacks, Venter anteriorly pale and posteriorly black (**Pérez-Santos and Moreno**, 1988) .....*Pseustes shropshirei*
46. Dorsal pattern with longitudinal black bands; 147-148 ventrals; 125-126 subcaudals .....  
..... *Dendrophidion bivittatus*
- 46' Dorsal pattern with traverse black bands; 162 ventral; 117 subcaudals .....*Dendrophidion percarinatus*

## Appendix 2. Species list and registers sites.

Family	Species	Terán	Guadualito (ICN)	Guadualito (UIS-R)
Amphisbaenidae	<i>Amphisbaena fuliginosa</i>		X	
Boidae	<i>Boa constrictor</i>	X	X	
Colubridae	<i>Atractus</i> sp.	X		
	<i>Chironius grandisquamis</i>		X	
	<i>Dendrophidion bivittatus</i>		X	X
	<i>D. percarinatus</i>		X	
	<i>Imantodes cenchoa</i>	X	X	
	<i>Leptodeira septentrionalis</i>	X		
	<i>Leptophis ahaetulla</i>		X	
	<i>Liophis epinephelus</i>		X	
	<i>L. melanotus</i>	X		
	<i>Mastigodryas boddaerti</i>		X	
	<i>Oxybelis aeneus</i>			X
	<i>Pseustes schropshirei</i>		X	
	<i>Spilotes pullatus</i>		X	
	<i>Stenorrhina degenhardtii</i>			X
<i>Tantilla melanocephala</i>	X	X		
Crotalidae	<i>Bothrops asper</i>	X	X	
Elapidae	<i>Micrurus dumerilli</i>		X	
	<i>M. mipartitus</i>			X
Gekkonidae	<i>Gonatodes albogularis</i>	X		
	<i>Hemidactylus brookii</i>	X		
	<i>Lepidoblepharis intermedius</i>		X	
	<i>L. xanthostigma</i>	X		
	<i>Sphaerodactylus heliconiae</i>	X		X
	<i>S. lineolatus</i>	X		
Gymnophthalmidae	<i>Thecadactylus rapicauda</i>	X		X
	<i>Bachia bicolor</i>	X		
	<i>Echinosaura horrida</i>			X
	<i>Leposoma rugiceps</i>	X		
	<i>L. southi</i>	X		
	<i>Ptychoglossus festae</i>	X	X	
Iguanidae	<i>Tretioscincus bifasciatus</i>	X	X	X
	<i>Norops auratus</i>	X		
	<i>A. frenatus</i>		X	
	<i>N. mariarum</i>			X
	<i>N. sulcifrons</i>	X	X	
	<i>N. tolimensis</i>		X	
	<i>N. tropidogaster</i>	X	X	X
	<i>N. vittigerus</i>		X	
	<i>Basiliscus galeritus</i>		X	
<i>Iguana iguana</i>	X			
<i>Polychrus gutturosus</i>		X		
Kinosternidae	<i>Kinosternon leucostomum</i>		X	
Scincidae	<i>Mabuya mabouya</i>		X	X
Teiidae	<i>Ameiva festiva</i>			X
	<i>Cnemidophorus lemniscatus</i>	X		

### Appendix 3. Examined specimens

*Amphisbaena fuliginosa* ICN 7247. *Ameiva festiva* UIS-R-0385, 0387, 0386. *Norops auratus* ICN 8946. *Anolis frenatus* ICN 7237. *N. mariarum* UIS-R-278. *N. sulcifrons* ICN 7217, 7221, 8947, 8958, 8959. *N. tolimensis* ICN 7229. *N. tropidogaster* ICN 7218, 7219, 7222, 7223, 7224, 7225, 7226, 7227, 7228, 7231, 7232, 7237, 8942, 8957, 8960, 8978, UIS-R-0254, 0255, 0299, 0456. *Anolis vittigerus* ICN 7215. *Atractus* sp. ICN 8964. *Bachia bicolor* ICN 8969, 8972. *Basiliscus galeritus* ICN 7240, OVC 847, OVC 869. *Bothrops asper* ICN 8953. *Chironius grandisquamis* OVC 846. *Cnemidophorus lemniscatus* ICN 8943, 8945. *Dendrophidion bivittatus* ICN 7244, UIS-R-0277. *Dendrophidion percarinatus* ICN 7243. *Echinosaura horrida* UIS-R-0457. *Hemidactylus brookii* ICN 8956. *Imantodes cenchoa* ICN 7245, 7250, 8941, 8942. *Kinosternon leucostomum* ICN 7671, 7672, 7673. *Lepidoblepharis intermedius* ICN 7233. *Lepidoblepharis xanthostigma* ICN 8966, 8983, 8987, 8990. *Leposoma rugiceps* ICN 8965, 8970, 8973, 8974, 8976, 8979, 8982, 8989. *Leposoma southi* ICN 8962, 8977, 8981, 8984, 8985, 8986, 8988. *Leptodeira septentrionalis* ICN 8948. *Leptophis ahaetulla* ICN 7249, OVC 882. *Liophis epinephelus* ICN 7246. *Liophis melanotus* ICN 8963. *Mabuya* sp OVC 891, OVC 892, OVC 880, UIS-R-0264, 0265, 0268, 0269, 0270, 0271, 0272, 0273, 0286, 0288, 0291, 0294, 0310, 0311, 0312, 0314, 0315, 0316, 0320, 0323, 0322, 0324, 0325, 0326, 0335, 0336, 0337, 0339, 0340, 0341, 0343, 0344, 0345, 0346, 0347, 0350, 0351, 0352, 0353, 0354, 0355, 0364, 0367, 0368, 0369, 0370, 0372, 0373, 0374, 0375, 0376, 0377, 0378, 0379, 0381, 0382, 0383, 0384, 0396, 0397, 0398, 0399, 0400, 0401, 0402, 0403, 0404, 0405, 0406, 0407, 0408, 0409, 0410, 0411, 0412, 0413, 0415, 0428, 0429, 0430, 0431, 0432, 0433, 0434, 0435, 0436, 0437, 0438, 0439, 0440, 0441, 0442, 0443, 0444, 0445, 0446, 0447, 0448. *Mastigodryas boddaerti* ICN 7248. *Micrurus dumerilli* ICN 7213. *Micrurus mipartitus* UIS-R-0275. *Oxybelis aeneus* UIS-R-0303. *Polychrus gutturosus* ICN 7238, UIS-R-0252. *Pseustes shropshirei* OVC 851. *Ptychoglossus festae* ICN 7230, 8961, 8967. *Sphaerodactylus heliconiae* ICN 8975, UIS-R 0475, 0913, 0920. *Sphaerodactylus lineolatus* ICN 8971. *Spilotes pullatus* OVC 881. *Stenorrhina degenhardtii* UIS-R-276. *Tantilla melanocephala* ICN 7251, 8944. *Thecadactylus rapicauda* ICN 8951, 8954, UIS-R 0253, 0279, 0304. *Tretioscincus bifasciatus* ICN 7216, 7236, 7242, 8949, 8950, 8968, OVC 874, 877, UIS-R 0256, 0257, 0258, 0295, 0300, 0327, 0455, 0460, 0462, 0463, 0464, 0465, 0467, 0468, 0471, 0472, 0473, 0474.

# ESTUDIO DE EMERGENCIA DE INSECTOS ACUÁTICOS EN LAS ZONAS DE BOSQUE RIPARIO, BOSQUE PLANTADO Y PASTOS, ABEJORRAL (ANTIOQUIA, COLOMBIA)

Por

Juan Camilo Rúa-Rivillas<sup>1</sup> & Gabriel Roldán-Pérez<sup>2</sup>

## Resumen

**Rúa-Rivillas, J.C. & G. Roldán-Pérez.** Estudio de emergencia de insectos acuáticos en las zonas de bosque ripario, bosque plantado y pastos, Abejorral (Antioquia, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **32**(122): 105-123, 2008. ISSN 0370-3908.

Entre marzo-agosto del 2004, se realizaron muestreos quincenales de insectos acuáticos emergentes en quebradas con riberas cubiertas de bosque ripario, plantado y pasto respectivamente, en un área de protección-producción hídrica, en el municipio de Abejorral, con el fin de analizar las influencias de las coberturas y las épocas climáticas sobre la comunidad de la fauna béntica emergente. El mayor número de individuos emergió entre los meses que corresponden a la sequía (julio-agosto). La “zona de bosque ripario” fue la de mayor diversidad pero menor abundancia, seguida por la “zona de bosque plantado” y en tercer lugar la “zona de pastos” con menor diversidad y mayor dominancia. En esta zona se presentaron las mayores abundancias de familias emergentes y temperaturas del agua. Entre la comunidad de insectos emergentes predominaron los dípteros. Las familias Anthomyiidae, Ceratopogonidae, Dixidae, Noctuidae, Pyralidae, Sciomyidae y Stratiomyidae, emergieron solamente en tiempo de lluvia; Sarcophagidae, Leptoceridae, Braconidae y Muscidae, emergieron en tiempo de sequía. En las tres zonas las familias Cecidomyiidae, Dolichopodidae y Tipuliidae emergieron continuamente durante el tiempo de estudio.

**Palabras clave:** emergencia, insectos acuáticos, bosque ripario, plantado, pasto.

## Abstract

Between march and august 2004 samples were taken every two weeks on aquatic insects coming from rivers, covered with some ripary forest and active grass, in an hydric protection area at the town of Abejorral in order to analyze the influences of covers and climate epoch on the

<sup>1</sup> Colorquímica S.A. Medellín Colombia. Email: jucaru1@hotmail.com.

<sup>2</sup> Director Investigación y Desarrollo, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Antioquia, Colombia. E-mail: grolan@uco.edu.co

bentic fauna community. The major number of species emerged between the months that are usually dry up (July - August), the riparian forest zone, was the most diversified but less abundant, follow by planted zone forest and then by the grass zone with less diversity and higher dominion. In that zone major abundant families were found and major temperatura in the water. Among the emerging insects Diptera dominated. The Anthomyiidae family, Ceratopogonidae, Dixidae, Noctuidae, Pyralidae, Sciomyidae and Stratiomyiidae, emerged only at rainy season, Sarcophagidae, Leptoceridae, Braconidae and Muscidae, Dolichopodidae and Tipuliidae emerged continuously along the studying time.

**Key words:** emergency, aquatic insects, ripary forest, planted, grass.

## Introducción

La mayoría de los insectos más conocidos son terrestres; sin embargo, existen una serie de órdenes cuyos representantes, o algunos de ellos, desarrollan toda o parte de su vida en el medio acuático, bien sean charcas, arroyos o lagos (Wolf *et al.*, 1988). Básicamente se pueden distinguir dos grandes grupos de insectos acuáticos: los que viven en el agua prácticamente toda su vida y los que pasan una etapa de su vida (generalmente la fase juvenil: de larva o ninfa) en el agua y la otra (generalmente de adulto o etapa reproductora) en el medio terrestre, pero más o menos asociado a masas de agua, puesto que han de depositar sus huevos en dicho medio o en las proximidades (Wolf *et al.*, 1988). Los estudios sobre la emergencia de insectos acuáticos se han relacionado básicamente con la productividad biológica en cuerpo de aguas lólicas (Illies, 1971, 1972, 1975).

Para la mayor parte de los grupos de insectos acuáticos, la etapa de vida adulta, reproductora y periodo de vuelo, se concentra en un breve espacio de tiempo. El periodo de vuelo es la etapa de máximo potencial de dispersión para los insectos con larvas o ninfas acuáticas (Hutchinson, 1981) y concentra todos los procesos reproductores que perpetúan la especie (Brittain, 1990).

La fenología de los períodos de vuelo o fase reproductora está condicionada en los insectos acuáticos por factores como la temperatura del agua o el fotoperíodo (Corbet, 1964; Sweeney, 1984; Stazner, 1976; Andreazze y Daniel, 2002) que actúan como estímulos desencadenando la respuesta fisiológica, en este caso la maduración y emergencia de los individuos. Otros factores como la precipitación también afectan el momento de la emergencia, aunque esto no es notorio en la zona tropical (Corbet, 1964), aunque hay mayor emergencia en periodo seco (Dittmar, 1955). Así mismo se ha señalado el papel de otras condiciones como la humedad relativa, el viento y la temperatura (Nebeker, 1971; Saeten Saeten & Brittain, 1985). La

temperatura afecta también la tasa de desarrollo larval o ninfal al influir en el metabolismo y asimilación del alimento (Sweeney, 1984). Con relación a estos factores, la altitud va a condicionar indirectamente la emergencia de muchos insectos acuáticos (retrasos de la emergencia cuando bajan las temperaturas) (Sweeney, 1984).

Matthias (1982) encontró que las aguas con pH neutro o ligeramente ácido presentan una mayor riqueza de especies, en contraste con aquellas aguas con niveles de pH ácidos, en donde la diversidad específica es muy pequeña debido a los efectos tóxicos de las altas concentraciones de hidrogeniones.

Los factores antrópicos más importantes que pueden influir en la comunidad bentónica son sin duda el oxígeno y la temperatura, la vegetación riparia y del cauce, la velocidad de la corriente y el tipo de sustrato. Los bosques de ribera influyen en el grado de insolación sobre las aguas y el aporte del material alóctono (Barbour y Stribling, 1991; Plafkin *et al.*, 1989). La cantidad y la calidad del recurso alimenticio que aporta la vegetación de ribera con la hojarasca, determina la disponibilidad de nutrientes para la comunidad de macroinvertebrados, por lo que afecta su riqueza y abundancia (Frank, 1983; Richardson, 1999).

Los estudios acerca de la biología y la ecología de los insectos en los cuerpos de agua continentales en Sur América, se han orientado fundamentalmente hacia el conocimiento taxonómico y dinámica de las poblaciones de los macroinvertebrados, mientras que los fenómenos de emergencia de los insectos acuáticos han permanecido poco estudiados.

El estudio de los macroinvertebrados acuáticos en Colombia ha sido tema de estudio en las últimas décadas (Roldán *et al.*, 1973; Correa *et al.*, 1981; Arango y Roldán, 1983; Álvarez y Roldán, 1983; Roldán, 1988; Roldán, 2001, 2003). Estudios realizados en otros países están reporta-

dos en **Illies** (1969, 1971, 1972, 1977), **Statzner** (1976), **Merritt & Cummins** (1996).

Desde el punto de vista de la emergencia de los insectos acuáticos se ha realizado dos estudios en Colombia (**Wolf et al.**, 1988), mediante el cual se determinaron las poblaciones de insectos que emergían de larva a adulto en las diferentes etapas del año, en tres ecosistemas diferentes: frío, templado, cálido y el de **Rincón** (2002), en el cual se caracterizaron la composición y las variaciones espaciales y temporales de la comunidad de insectos acuáticos de la quebrada Mamarramos, en el Parque de Fauna y Flora de Iguaque (Boyacá).

## Metodología

### Zonas de muestreo

Inicialmente se realizó identificación de sitios que tuvieran condiciones aptas para el estudio, luego se hizo reconocimiento de la fauna béntica en cada sitio de estudio y se tomó una muestra de agua con el fin de establecer a grandes rasgos la diversidad biológica y las características fisicoquímicas del agua en los diferentes sitios de muestreo. El periodo de muestreo para las tres zonas se extendió desde el 3 de abril de 2004 hasta el 21 de agosto de 2004. Finalmente, se procedió a elegir los sitios de muestreo, de donde el promedio del ancho de las quebradas hasta la ribera fue 140 cm. Para el establecimiento del área de muestreo se buscó también, que las riberas de las quebradas estuvieran cubiertas por *bosque natural* (Zona 1), *bosque plantado pino ciprés* (Zona 2) y *pasto* (Zona 3); los puntos de muestreo deberían estar preferiblemente a una misma altura sobre el nivel del mar (2460) con poca intervención del hombre.

### Descripción e instalación de las “trampas de captura”

Para la construcción de una trampa de emergencia se debe disponer del siguiente material: cuatro palos de aproximadamente 2 m de largo y 6 cm de diámetro, cuatro palos de 50 cm de largo y 6 cm de diámetro, 10-4 m de tela toldillo, 1 m de vinilo grueso, una caja de acrílico transparente con tapa del mismo material, un soporte metálico y 30 m de alambre de amarre.

La trampa cubre un área aproximada de 2 m<sup>2</sup>, tiene forma de pirámide y el vértice, donde va la caja de acrílico o caja de emergencia, rectangular. La caja de emergencia posee en el centro un compartimento que contiene alcohol y glicerina en una proporción de 9:1 respectivamente. La trampa tiene aproximadamente 1.50 m de altura y esta cubierta por tela toldillo para permitir el paso de la luz (Fig.1).



**Figura 1.** La trampa en campo y la caja de captura.

Los cuatro palos de 50 cm de largo se fijan a la ribera de la quebrada, de tal manera que cada uno quede ubicado con respecto al otro a una distancia de 2 m, formando un cuadrado sobre la quebrada. De cada vértice del soporte metálico en donde se inserta la caja de emergencia se eleva un palo de 2 m de largo formando una pirámide, la cual va unida al cuadrado previamente construido sobre la quebrada (Figura 1); luego con la tela toldillo se cubre todos los espacios entre cada palo formando un toldo. El vinilo se coloca en los lados de la trampa que están en contacto con el agua, para evitar que otro organismo penetre al interior. Finalmente se realiza un amarre a todos los palos con alambre para que las corrientes fuertes no se lleven la trampa.

### Parámetros fisicoquímicos

Simultáneamente a la captura de los organismos se tomaron muestras de agua para los análisis físicoquímico. La temperatura del agua, oxígeno, pH y la conductividad se determinaron en el sitio de muestreo.

### Recolección de los adultos

Tan pronto como los insectos finalizan su estadio larval emergen del agua como adultos voladores y alcanzan la parte superior de la trampa, donde se encuentra la caja de emergencia que contiene la emulsión de alcohol y glicerina, allí son atrapados y fijados por el alcohol. La glicerina evita que los insectos se resequen, deformen y decoloren antes de su identificación en el laboratorio (Roldán, 1988).

### Descripción del área

Para el presente estudio se eligieron tres zonas ubicadas entre los pisos altitudinales (2400-2490) localizadas en el municipio de Abejorral, en el departamento de Antioquia, Colombia (Fig. 2).

El municipio de Abejorral ubicado a latitud Norte 5° 47' N y longitud 75° 25' O, pertenece a la región del Oriente Antioqueño, su territorio va desde los 1100 hasta los 2500 metros sobre el nivel del mar. Las zonas menos intervenidas antropicamente se encuentran a unas alturas de 2350-2500 m.s.n.m, la temperatura fluctúa entre 11-18 °C, una precipitación anual de 2500 a 3500 mm. Según Holdridge (1977) las zonas del muestreo pertenecen a un bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB). La región en su mayor parte es boscosa "bosque ripario" en donde hay áreas de pino "bosque plantado" y áreas en proceso de conservación de fuentes hídricas.

La estación 1 en "bosque ripario" se ubicó en la quebrada "Angostura" (2450 msnm) afluente principal del acueducto municipal a una distancia de 8 Km del casco urbano del municipio de Abejorral. El sitio de muestreo presenta las siguiente características: ancho 1.3 m; profundidad 0.4 m; velocidad del cauce 0.95 m/s; con un caudal promedio de 0.2m<sup>3</sup>/s; Área cubierta por la trampa 2 m<sup>2</sup>. La ribera presenta abundante vegetación riparia sin intervención antrópica, el sustrato está constituido principalmente por vegetación en descomposición y piedras. En su recorrido presenta grandes rápidos y caídas (Fig. 3).

La estación 2 "bosque plantado" se ubicó en la quebrada la Pinera (2455 msnm) a 15 Km. de Abejorral. El sitio de muestreo presenta las siguientes característi-

cas: ancho 0.9 m; profundidad 0.1 m; velocidad de la corriente 0.5 m/s; con un caudal promedio de 0.07 m<sup>3</sup>/s; área cubierta por la trampa 2 m. La ribera está conformada por árboles plantados (Ciprés), el sustrato de la quebrada está constituido principalmente por raíces, piedras, arena en algunos casos y acículas en descomposición. En su recorrido presenta pocos rápidos, en sí el flujo es lento (Fig. 4).

La estación 3 "zona de pasto" se ubicó en la quebrada Catalina (2460 msnm) afluente principal del acueducto multiveredal El Guaico a una distancia de 17 Km del casco urbano del municipio de Abejorral. El sitio de muestreo presenta las siguientes características: ancho 1 m; profundidad 0.3 m; velocidad de la corriente 0.1 m/s; con un caudal promedio de 0.1m<sup>3</sup>/s; área cubierta por la trampa 2 m. La ribera presenta deficiente vegetación, en su mayoría su área es pasto y rastrojo, hay vestigios de la intervención antrópica, el sustrato está constituido principalmente por grava, piedras y arena. En su recorrido presenta rápidos y recibe mucho sedimento en tiempo de lluvias (Fig. 5).

## Resultados

### Fisicoquímicos

Los valores de los parámetros fisicoquímicos considerados en el presente estudio, muestran leve variación durante el periodo en que se realizó el seguimiento.

Los valores de oxígeno disuelto indican que las aguas de las tres zonas de estudio, tienen muy buen porcentaje de oxígeno cercano al 100 % durante todo el período de estudio; se presentan fluctuaciones significativas entre algunas semanas de los meses de mayo, junio y el mes de agosto (Fig. 6).

El comportamiento del pH muestra como la zona de "bosque ripario" es la que presenta mayor fluctuación con un pH promedio de 6.9; la zona de "bosque plantado" con un pH de 6.1 y " la zona de pasto" con un pH de 6.6. Para el "bosque plantado" puede que el pH esté influenciado por la descomposición del material de conífera, ya que estas presentan compuestos diferentes a las latifolias, en especial las acículas que el proceso de descomposición segregan sustancias que acidifican el medio (Carballo, 1990) (Fig. 7).

La conductividad en las zonas de "bosque plantado" y "bosque ripario" fueron similares, en promedio estuvo entre 7.3 y 7.6  $\mu$ s/cm (Fig. 8). En la zona de "pasto" el promedio fue de 8.9  $\mu$ s/cm. Los valores más elevados se observaron entre los meses de abril - mayo y finales de junio, tiempo en que se presentaron mayores precipitaciones.



Figura 2. Localización de las zonas de muestreo.



**Figura 3.** Trampa y sustrato del bosque ripario.



**Figura 4.** Sustrato y la rívera de bosque plantado.



**Figura 5.** Trampa en zona de pasto y sustrato del cauce.

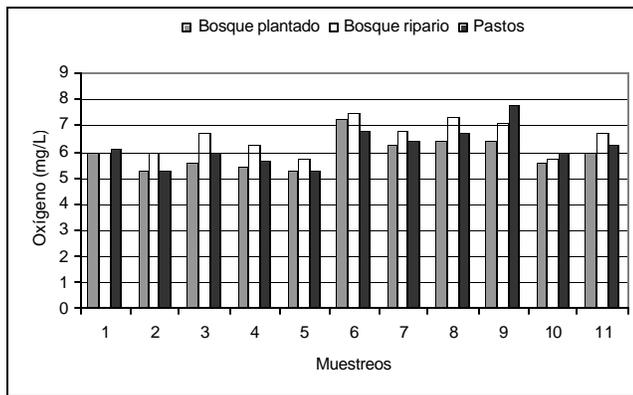


Figura 6. Valores de oxígeno disuelto.

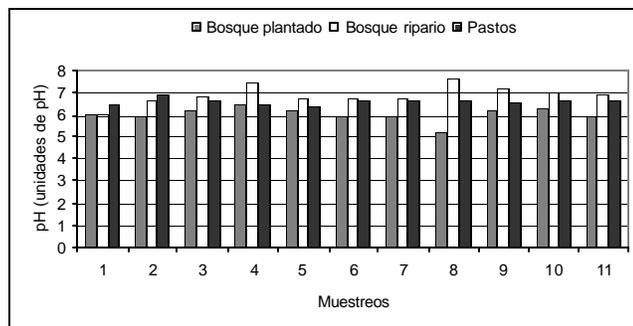


Figura 7. Valores de pH.

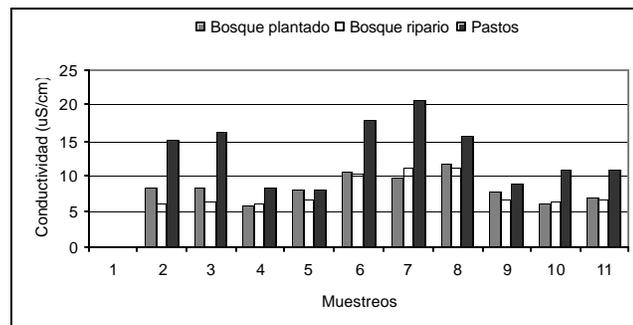


Figura 8. Valores de conductividad.

Considerando que los sitios de muestreo se encuentran a una misma altitud sobre el nivel del mar (2460 m.s.n.m), los valores de temperatura son muy similares. El promedio de temperatura más alto se presenta en la “zona de pasto”, correspondientes a la primera semana de mayo, el mes de junio y parte de agosto; y los rangos mínimos se observaron a finales del mes de junio. Las zonas de “bosque ripario” y “bosque plantado” no presentaron variaciones de temperatura significativas durante el período de estudio (Fig. 9).

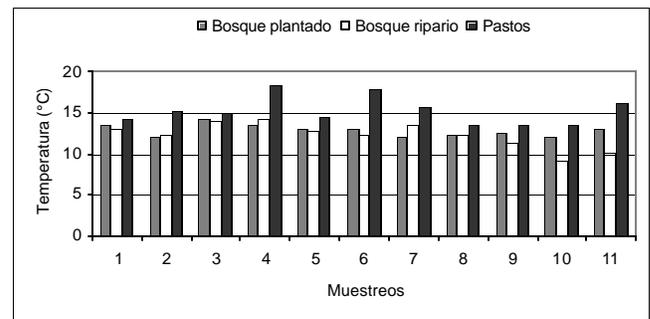


Figura 9. Valores de temperatura.

## Biológicos

Durante el periodo de estudio se capturaron 4.123 individuos pertenecientes a siete órdenes y 41 familias. El orden díptera muestra el mayor número de familias 26 en total y 3937 individuos. Los tricópteros están representados por cinco familias y 50 individuos que constituyen el segundo orden en importancia numérica de familias. Otros órdenes encontrados fueron: Plecoptera, Hymenoptera, Lepidoptera, Coleoptera y Homoptera, los cuales porcentualmente tuvieron baja representación.

### Orden Diptera

Los dípteros constituyen uno de los órdenes de insectos más complejos, abundantes y ampliamente distribuidos en el mundo. Desde el punto de vista tanto ecológico como sanitario, algunas de sus especies son vectores de enfermedades propias del trópico. Los dípteros son insectos holometabolos y su ciclo de vida es muy variable, dependiendo de las especies; pueden ser de semanas unos y de cerca de años otros. Viven en hábitats muy variados; ríos arroyos, lagos etc. Las larvas se fijan al sustrato a través de ganchos y ventosas y poseen un órgano respiratorio por cada especie.

Los dípteros adultos se caracterizan por la presencia de dos alas anteriores bien desarrolladas y dos posteriores vestigiales, llamadas alterios o balancines. La venación de éstas, el número y forma de los segmentos antenales constituyen los criterios taxonómicos más importantes.

Dentro de este grupo se distinguen dos subórdenes: Nematocera (antenas largas), tipulidos o zancudos, y Brachicera (antenas cortas) muscudos o moscas caseras. El grupo de los dípteros es el más importante encontrado en el presente estudio (3937 individuos).

En la “zona de pasto” se encontraron 25 familias y en cuanto a individuos fue la más abundante (1626). La fami-

lia Empididae fue la más numerosa 615 individuos, la segunda familia en importancia fue la Cecidomyiidae 264 individuos, y el periodo de emergencia mas alto para estas dos familias fue en el mes de agosto (Tabla 1). Otras familias importantes fueron: Tipullidae, Syrphidae, Dolichopodidae, Ceratopogonidae, Muscidae y Culicidae.

En “bosque Plantado” se recolectaron 24 familias (1320) individuos; las familia más representativa fue la Cecidomyiidae (555) individuos, su pico de emergencia fue la primera semana de agosto, en segundo lugar la familia Chironomidae (126) individuos y su pico de emergencia fue durante el mes de julio (Tabla 2). Otras familias impor-

**Tabla 1.** Distribución de individuos colectados en la “zona de pasto”.

Muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
<b>Diptera</b>												
Anthomyiidae	0	0	0	0	2	0	9	0	0	0	0	11
Bibionidae	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Calliphoridae	0	0	0	2	0	20	32	85	5	6	5	155
Cecidomyiidae	25	0	0	6	15	27	27	0	55	41	68	264
Ceratopogonidae	0	4	0	0	0	5	11	0	0	0	0	20
Chironomidae	0	5	0	0	3	4	0	1	5	0	0	18
Culicidae	1	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	5
Dixidae	0	0	0	0	3	0	0	34	0	3	0	40
Dolichopodidae	2	10	0	2	6	30	51	18	28	30	31	208
Dryopidae	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Empididae	1	24	1	0	28	66	15	0	104	263	113	615
Ephydriidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Muscidae	3	3	0	0	4	0	20	0	2	11	22	65
Phoridae	3	0	0	0	1	0	3	0	0	0	3	10
Pipunculidae	0	8	0	0	2	0	3	0	1	1	2	17
Psychodidae	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	3
Sarcophagidae	0	4	0	0	2	0	0	0	0	0	48	54
Sciomycidae	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Simuliidae	0	0	0	0	1	0	0	11	0	0	0	12
Stratiomyidae	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Syrphidae	2	1	1	1	0	0	0	3	0	8	9	25
Tabanidae	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2
Tachinidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Tanyderidae	0	0	0	0	4	0	7	0	1	0	0	12
Tipulidae	10	27	0	0	10	0	13	2	6	4	5	77
<b>Trichoptera</b>												
Calamoceratidae	1	1	1	0	0	0	0	5	1	2	0	11
Hydroptilidae	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2
Hydropsychidae	0	2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	5
Leptoceridae	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	3
Odontoceridae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
<b>Hymenoptera</b>												
Braconidae	0	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	5
Ichneumonidae	0	1	2	0	1	1	2	4	0	0	0	11
<b>Lepidoptera</b>												
Noctuidae	0	1	23	0	2	1	0	3	1	0	0	31
Pyralidae	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4
<b>Odonata</b>												
Aeshnidae	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	3	5
Coenagrionidae	0	0	1	5	1	2	0	0	1	2	3	15

**Tabla 2.** Distribución de individuos colectados en la “zona de bosque plantado”.

Muestreo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
<b>Diptera</b>												
Anthomyiidae	3	0	0	8	0	2	4	0	0	0	13	30
Bibionidae	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Calliphoridae	2	0	0	0	0	0	7	0	5	1	15	30
Cecidomyiidae	5	8	8	6	35	13	137	45	94	111	93	555
Ceratopogonidae	0	5	5	1	0	9	10	13	21	10	15	89
Chironomidae	9	7	7	0	7	6	35	15	15	12	13	126
Culicidae	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	4
Curculionidae	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Dixidae	2	3	3	0	3	3	0	0	0	0	0	14
Dolichopodidae	3	10	10	3	18	7	0	11	19	7	25	113
Empididae	0	1	1	0	2	0	7	0	0	0	27	38
Ephydriidae	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	6
Muscidae	0	0	0	0	0	6	7	4	6	17	34	74
Dryopidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pipunculidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	5
Psychodidae	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	4
Sarcophagidae	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53	54
Sciomyzidae	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5
Stratiomyidae	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3
Syrphidae	2	0	0	0	0	2	2	2	2	1	5	16
Tabanidae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
Tachinidae	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	4
Tanyderidae	1	0	0	2	2	6	4	5	3	15	5	43
Tipulidae	0	5	5	4	0	9	27	13	13	9	7	92
<b>Trichoptera</b>												
Calamoceratidae	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	4
Hydroptilidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Hydropsychidae	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	4
Leptoceridae	3	0	0	0	1	0	1	3	1	2	3	14
<b>Hymenoptera</b>												
Braconidae	0	0	0	2	0	0	2	0	1	2	0	7
Ichneumonidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
<b>Lepidoptera</b>												
Noctuidae	5	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	9
Pyralidae	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
<b>Odonata</b>												
Coenagrionidae	0	0	5	5	0	2	0	1	0	4	3	20

tantes fueron: Dolichopodidae, Ceratopogonidae, Muscidae y Tipullidae.

En “bosque ripario” se capturaron 21 familias (991) individuos, la familia más representativa fue Cecidomyiidae (245) individuos, su mayor recolección fue la última semana de junio; en segundo lugar Tipullidae (139) individuos,

su mayor emergencia se presentó en abril y la última semana de junio (Tabla 3). Otras familias importantes fueron: Dolichopodidae, Chironomidae, Tanyderidae.

Los integrantes de la familia Cecidomyiidae, son conocidos como cecidomíidos o mosquitos de agallas; son moscas finas y frágiles, el color es variable, algunas veces

**Tabla 3.** Distribución de individuos colectados en la “zona de bosque ripario”.

<b>Diptera</b>												
Anthomyiidae	4	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	7
Calliphoridae	3	1	2	0	0	0	0	0	5	0	0	11
Cecidomyiidae	5	0	0	5	17	9	63	21	22	40	63	245
Ceratopogonidae	0	45	5	0	5	9	23	9	0	5	23	124
Chironomidae	1	18	2	5	22	7	0	12	0	7	13	87
Culicidae	0	0	1	0	0	3	0	1	0	0	0	5
Dixidae	2	5	16	0	2	5	11	6	7	3	0	57
Dolichopodidae	40	21	0	12	3	9	21	7	3	6	0	122
Dryopidae	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	4
Empididae	1	10	2	0	0	3	0	4	0	0	0	20
Ephydriidae	10	1	0	0	0	2	19	2	1	0	3	38
Muscidae	2	4	6	4	3	0	5	0	0	0	0	24
Phoridae	0	0	0	0	1	0	3	2	0	0	0	6
Pipunculidae	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	2
Psychodidae	0	0	0	0	0	0	8	1	0	3	0	12
Sarcophagidae	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
Sciomyiidae	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Simuliidae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Stratiomyidae	0	0	5	0	10	0	0	0	0	0	0	15
Tanyderidae	3	0	0	27	8	7	5	0	3	6	9	68
Tipulidae	20	25	15	0	10	5	27	13	7	5	12	139
<b>Trichoptera</b>												
Hydroptilidae	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	3
Hydropsychidae	1	6	0	0	0	0	2	0	1	0	0	10
Calamoceratidae	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2
Leptoceridae	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	3
Odontoceridae	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
<b>Plecoptera</b>												
Perlidae	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
<b>Hymenoptera</b>												
Braconidae	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2
<b>Lepidoptera</b>												
Noctuidae	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3
<b>Coleoptera</b>												
Elmidae	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
Dryopidae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2
<b>Hemiptera</b>												
Fulgoridae	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1

con patrones llamativos claros y oscuros. Las agallas de los cecidomíidos pueden ser encontradas en casi todos los grupos de plantas. No todos los cecidomíidos se alimentan de plantas; las especies más primitivas se alimentan de materia orgánica en descomposición y muchos otros son asociación con ciertos hongos.

Los quironómidos son dípteros pequeños (de 2 a 10 mm). Los adultos, al emerger, dejan en la superficie del

agua las pieles (exuvias) de las pupas, las cuales son importantes taxonómicamente. Las larvas habitan ríos, arroyos y lagos, aunque se pueden encontrar también en pozos, huecos, rocas, heces de animales y prácticamente en cualquier ambiente húmedo. Las larvas generalmente viven en tubos pegados a piedras, troncos o en la arena, hechos de gran variedad de materiales. Algunas especies viven libremente en el fondo. Los adultos viven muy poco tiempo, desde sólo unos días hasta

varias semanas, y no se alimentan. Los adultos son atraídos a las luces y forman enjambres cerca de lagos y ríos grandes, especialmente al amanecer o atardecer. Los huevos son puestos en el agua en tiras envueltas en mucílago.

Los adultos de Tipuliidae pueden ser encontrados en hábitats variados: a lo largo de corrientes de agua, en bosques nubosos, y aún en desiertos, pero generalmente cerca del hábitat de las larvas. Las larvas pueden encontrarse en una gran variedad de hábitats acuáticos y terrestres y son comunes en los sedimentos, entre las hojas del fondo de corrientes o escurrideros; en bromelias epífitas, troncos podridos y otra materia vegetal en descomposición, hongos, musgos y suelo del bosque. Unas pocas especies pueden causar daño económico a cultivos agrícolas. Sólo en un porcentaje muy pequeño de las especies (<5%) se ha conseguido asociar las larvas con sus respectivos adultos.

La familia Empididae, los adultos y las larvas son depredadores de otros insectos. Algunos adultos se alimentan de flores; en ciertas especies forman enjambres que están conectados generalmente por un comportamiento de acoplamiento. Los adultos habitan en los cantos rodados, en corrientes o entre la vegetación marginal.

La familia Bibionidae capturada en los muestreos, no ha sido reportada como acuática, pero según **Borrór** (1976), esta familia se reproduce cerca a las orillas de las quebradas, en donde ovoposita en los troncos en estado de descomposición.

### Orden Trichoptera

Los trichópteros son insectos holometábolos, es decir, hacen metamorfosis completa. Viven en todo tipo de hábitat lóticos o lénticos, pero en donde alcanzan su mayor diversidad es en los lóticos fríos (**Roldán**, 1992).

El periodo larval transcurre en aguas limpias y oxigenadas. La mayoría de ellas construyen refugios con piedras, arena o material vegetal y se alimentan básicamente de algas y perifiton, raspando las rocas alrededor de sus casas. Los adultos viven cerca de las quebradas o riachuelos con abundante vegetación y son especialmente activos durante la noche, no se alimentan o si lo hacen, toman néctar de las flores (**Borrór**, 1976).

En la "zona de pasto" se encontraron cinco familias (22) individuos, las más representativas fueron: Calamoceratidae (11) individuos; su mayor pico de emergencia fue la primera semana de julio; la segunda en importancia fue Hydropsychidae (5) individuos, con un

comportamiento de emergencia estable (Tabla 3). Otras familias importantes fueron: Leptoceridae, Odontoceridae, Hydroptilidae.

En el "bosque plantado" se encontraron cuatro familias (23) individuos; la familia más representativa fue Leptoceridae con (14) individuos. No hubo representación de individuos durante en el mes de mayo y la familia Hydroptilidae sólo se capturo en una ocasión en el mes de agosto (Tabla 2). Otras familias fueron: Hydropsychidae y Calamoceratidae.

En la zona de "bosque ripario" se encontraron cinco familias de este orden, la más representativa fue Hydropsychidae con (10) individuos. En el mes de abril fue cuando se presentó su mayor emergencia; familias como Hydroptilidae, Calamoceratidae y Leptoceridae emergieron en bajo número de individuos (Tabla 3).

Los hidropsíchidos son una familia taxonómicamente diversa y que se encuentra en todo el mundo. Unos se alimentan de diatómeas, otras de algas y partículas de detritus de un amplio ámbito de tamaños, así como de pequeños invertebrados acuáticos. Algunas especies hilan redes con agujeros de diferentes diámetros y ésto determina el tamaño de las partículas de alimento que consumen (**Flint**, 1978).

Los leptocéridos son insectos delicados, de tamaño medio a grande (5 a 20 mm), alargado y delgados. Los adultos son de coloración variada. Algunos son completamente negros, amarillos o cafés, otros son amarillos con puntos negros. Los colores brillantes son producidos por pelos y escamas de las alas anteriores y el cuerpo. Los adultos carecen de ocelos. Las alas anteriores son largas y angostas. A diferencia de los otros Trichoptera, en Leptoceridae, los machos son más grandes que las hembras.

Las larvas son detritívoras o depredadoras y viven en aguas lentas o en las áreas de menor corriente de los ríos. Generalmente viven cerca del sustrato (**Holzenthall**, 1988).

### Orden Hymenoptera

En el aspecto económico su importancia para el hombre supera la de cualquier otro grupo de insectos. Algunas facetas de interés, que pueden ser destacadas en este sentido, son la polinización de plantas cultivadas, el control biológico por parte de himenópteros parasitoides de plagas agrícolas y forestales (**La Salle y Gauld**, 1993). No menos importante para el hombre es su valor medio-ambiental ya que se trata de un grupo de insectos que, no sólo forma un componente principal de la biodiversidad, sino que está presente en la mayor parte de los ecosistemas terrestres y acuáticos, además es vital en el mante-

nimiento de la diversidad de otros grupos (**Hawkins y Lawton, 1987**).

En total se recolectaron (27) individuos adultos pertenecientes a dos familias (Braconidae, Ichneumonidae). De estas dos familias encontradas en la “zona de Pasto” la más numerosa fue la familia Ichneumonidae con (11) individuos que presentaron su mayor emergencia en las primeras semanas de julio. De familia Braconidae sólo se colectaron (4) individuos que emergieron entre los meses de abril y junio (Tabla 1).

La “zona de bosque plantado” fue la segunda que presentó mayor número de emergencia con 10 individuos de la familia Braconidae y dos individuos de Ichneumonidae que emergieron en el mes de agosto (Tabla 2).

En la “zona de bosque ripario” solamente se encontraron dos individuos pertenecientes a la familia Braconidae que emergieron en mayo y junio (Tabla 3).

La familia Ichneumonidae y Braconidae son reconocidas como un controlador biológico de muchas plagas. Es un parásito larval y prefiere el segundo y tercer instar para realizar su oviposición. Su ciclo de vida es de 10-15 días, sincronizado con su hospedante. La temperatura ideal para su parasitismo y multiplicación es de 25°C-35°C (**Trabanino, 1998**).

### Orden Lepidoptera

Grupo de insectos más recientes desde el punto de vista filogenético; pocas familias presentan larvas acuáticas. Las larvas viven en aguas muy oxigenadas de curso rápido, bajo telas sedosas tejidas sobre superficie de rocas sumergidas y se alimentan de algas (**Roldán, 1992**).

En total se recolectaron (38) individuos pertenecientes a dos familias, Pyralidae y Noctuidae. La familia más representativa en emerger fue Noctuidae con (43) individuos y donde más emergieron fue la “zona de pasto”, seguida por la de “bosque plantado”; la zona de “bosque ripario” fue la de menor emergencia. Los meses de abril a junio presentaron la mayor cantidad de emergencia de esta familia (Tablas 1 y 2).

La familia Noctuidae es de gran importancia económica debido a los impactos producidos a la agricultura. Es un insecto con ciclo de vida completo, que incluye: huevos (3-5 días), 5 a 6 estadios larvarios (14-21 días), pupa (9-13 días) y adultos. Los huevos son colocados en grupos de hasta 300, sobre cualquier superficie de las hojas; son redondos, de superficie lustrosa, aunque están recu-

biertos por escamas gris-rosadas de la hembra en oviposición.

Se trata de un conjunto de especies que cortan plántulas al ras de la tierra en horas nocturnas, permaneciendo escondidas durante el día y enterradas a pocos centímetros. Ataca principalmente el césped “kikuyo grass” pero también solánaceas, crucíferas y quenopodiáceas, cereales y otras gramíneas silvestres, devora el tejido foliar de muchas plantas elevadas, perdidas en plantaciones forestales y campos de regeneración (**Elster, 1998**).

### Orden Odonata

Los odonatos llamados también libélulas o “caballitos del diablo” son insectos hemimetábolos cuyo periodo larval puede variar de pocos a muchos meses. Los odonatos son en general grandes depredadores. Se encuentran en aguas oligomesotróficas, propias de ecosistemas lénticos o de poca corriente, pero son poco resistentes a contaminación (**Roldán, 1992; Arango & Roldán, 1983**). Los adultos poseen cuatro alas bien desarrolladas, con venación bien definida. Se reconocen fácilmente por sus vivos colores y por su habilidad para el vuelo. En total se capturaron (40) individuos pertenecientes a dos familias, Coenagrionidae y Aeshidae.

En familia Coenagrionidae fue en donde más individuos emergieron, (35) en total; la mayor emergencia se produjo en la “zona de bosque plantado” con (20) individuos, seguida de la “zona de Pasto” con (15) individuos. Esta familia no se hizo presente en la “zona de bosque ripario”. De la familia Aeshidae sólo se recolectaron cinco individuos en la “zona de pasto” en las restantes zonas no se obtuvo capturas de esta familia.

### Orden Hemiptera

Los hemípteros, llamados también “chinchas de agua” se caracterizan por poseer las partes bucales modificadas en un pico chupador, que los hace supremamente depredadores de otros insectos acuáticos. Los hemípteros viven en los remansos de los ríos y en ecosistemas lénticos con abundante vegetación. En general comparten el mismo hábitat de los odonatos y tienen las mismas exigencias ecológicas (**Roldán, 1992; Álvarez & Roldán**).

Los homópteros de acuerdo a los individuos capturados se encontró que las familias no están reportadas como acuáticas. Según **Borrer (1976)** y **McCafferty (1981)**, tienen mucha relación por que la mayoría de su ciclo de vida se presenta en la vegetación emergente del agua o en las

riberas de los ríos. La familia Fulgoridae, perteneciente al suborden Homóptera; fue encontrada sólo en la “zona de bosque ripario”, en el mes de mayo (Tabla 3).

### Orden Coleoptera

Constituyen uno de los órdenes más grandes y complejos. Se caracterizan por que muchos representantes viven en el agua tanto en la forma larval como adulta (Roldán, 1992).

Para el estudio solamente se encontraron dos familias de Coleópteros: Elmidae y Hydrophilidae en la “zona de bosque ripario” cada una con dos individuos. En las dos zonas restantes no se encontró ningún individuo. Los Elmidae adultos no son completamente acuáticos como las larvas, viven generalmente en arena, grava, o madera sumergida en corrientes. Algunos se alimentan de algas y detritus, mientras que otros atacan las superficies arboladas, (McKie y Cranston, 1998).

### Orden Plecoptera

Es un grupo pequeño poco diversificado en el trópico. Las ninfas de los plecópteros viven en aguas rápidas, bien oxigenadas, bajo de piedras, troncos, ramas y hojas. Los plecópteros son prácticamente cosmopolitas, pero muy diversificados de acuerdo a la latitud y la altura (Roldán, 1992). De este orden sólo se encontró una familia Perlidae con un individuo en la “zona de bosque ripario” en el mes Junio, en las otras dos zonas no se encontró ninguna de familia perteneciente al orden Plecoptera.

Los adultos pueden variar entre los 9 y 15 mm de longitud, son de coloración que puede ir de café-amarillenta a negra y presentan dos ocelos. La biología de las ninfas es prácticamente desconocida. Pueden ser colectadas bajo las piedras en los rápidos o cerca de bancos de arena en ríos grandes o pequeños. Los adultos son atraídos fácilmente por las luces (Baumann, 1982).

## Análisis de resultados

### Fisicoquímicos

Por poseer el agua alto calor específico, los cambios en la temperatura, bajo condiciones normales, ocurre mucho más lentamente que en el aire. En general la temperatura es un factor determinante en la estructura de las comunidades y en la distribución de los organismos acuáticos. La temperatura deriva directamente de la radiación solar provocando ciclos de productividad que en el trópico están asociados a otros factores, tales como los periodos de lluvias y sequías que influyen directamente en los ecosistemas acuáticos (Roldán, 1992).

Los niveles de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua lóticos, dependen básicamente de los siguientes factores: velocidad de la corriente, temperatura, profundidad, grado de contaminación y procesos de descomposición, entre otros.

Las tres zonas de estudio tuvieron niveles de oxígeno correspondientes a aguas limpias y sin algún grado de contaminación (Fig. 6).

El pH es un factor importante en la biología y en la química de los sistemas de aguas naturales y afecta el grado de disociación de los ácidos y las bases. Los valores de los pH óptimos para la vida acuática se encuentra entre 6.5 y 7.5. Durante gran parte del periodo de estudio para las “zonas de bosque ripario” y “pastos” estuvieron dentro del rango óptimo; en la estación de “bosque plantado” presenta valores por debajo del rango mínimo óptimo (5.9) durante todo el estudio (Fig. 7). Una explicación sería las características de la vegetación de la rivera, la mayoría conformada por pino en donde la acícula en su proceso de descomposición segregan sustancias ácidas, por lo tanto, por medio de la escorrentia hace llegar estos compuestos al cuerpo de agua afectando sus propiedades.

La conductividad es una medida de iones disueltos en el agua, por lo tanto es un factor determinante en la composición de la biosenosis acuáticas. En el presente estudio los niveles de conductividad son muy bajos para la “zona de bosque plantado” y “bosque ripario”; en zonas de alta montaña y sin intervención no hay arrastre de sedimentos en altas cantidades a los lechos de agua, lo que no ocurre con la “zona de pasto” que si se observa valores de conductividad mayores a las de las otras dos zonas debido a poca cobertura vegetal del lugar que permite que la escorrentia lleva sedimentos a los cuerpos de agua (Fig. 8).

Se observó que la “zona de pasto” es la que presenta mayores temperaturas, en promedio unos (14 °C). Por lo tanto, para este estudio no se puede afirmar que este parámetro es determinante en los procesos de emergencia (Fig. 9).

## Biológicos

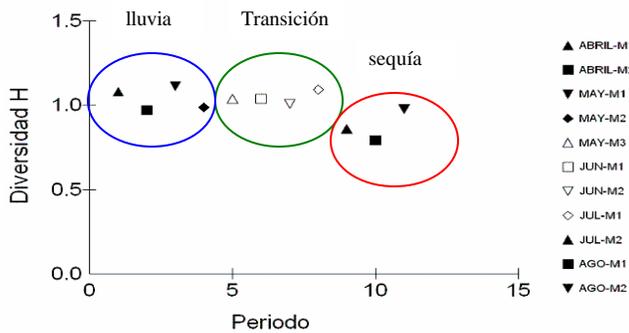
### Diversidad

En el sentido ecológico más estricto la diversidad - un concepto derivado de la teoría de la información, es una medida de la heterogeneidad del sistema, es decir, de la cantidad y proporción de los diferentes elementos que contiene. Además del significado que en sí misma tiene la diversidad, es también un parámetro muy útil en el estu-

dio, descripción y comparación de las comunidades ecológicas. Dado que la diversidad en una comunidad es una expresión del reparto de recursos y energía, su estudio es una de las aproximaciones más útiles en el análisis comparado de las comunidades, o incluso de regiones naturales (Halfpter & Ezcurra, 1992).

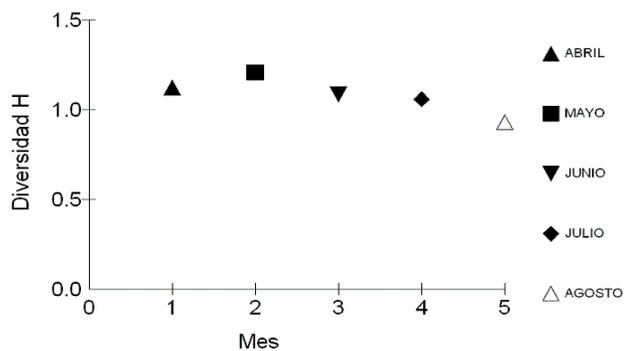
**Análisis de la emergencia con relación al número de individuos capturados**

Para el análisis se debe tener en cuenta un periodo de lluvia (abril, mayo y parte de junio) y el periodo de sequía (parte de junio, julio y agosto). Cómo puede verse en la figura 10, la diversidad fluctuó entre 1,11 y 0,79, durante las épocas de lluvia y tiempo seco respectivamente. Al final del período seco se presentaron algunas lluvias y el consecuente incremento de la diversidad.

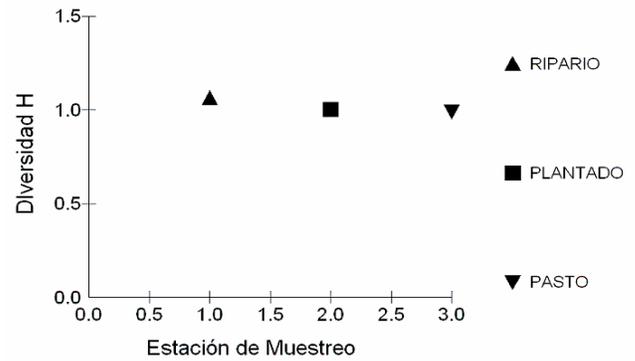


**Figura 10.** Diversidad total de cada uno de los muestreos durante el periodo de estudio.

En la figura 11 se observa el comportamiento de la diversidad total por mes de tiempo de estudio; en donde la diversidad de emergencia decrece en los meses de sequía (julio y agosto) e incrementa en los tiempos de lluvia (abril y mayo). Según la figura 12 la “zona de bosque ripario” es la más diversa pero no se observan diferencias significativas entre las tres zonas de estudio.

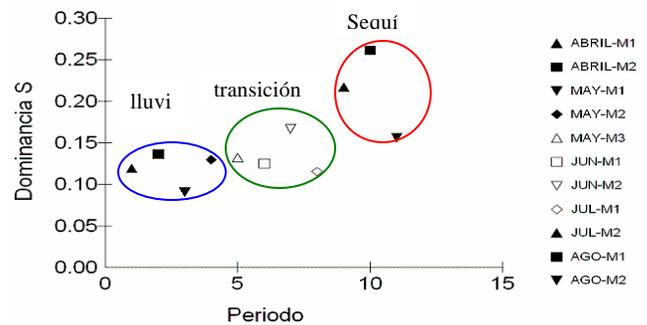


**Figura 11.** Diversidad total por meses del periodo de estudio.

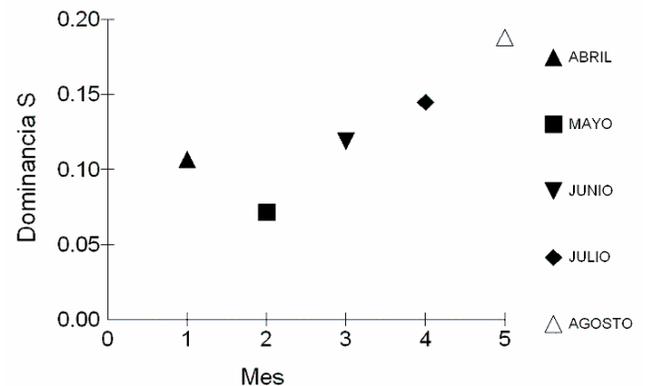


**Figura 12.** Diversidad total por estación de muestreo.

En cuanto a la dominancia, se puede ver su variación en las figuras 13 y 14. En la figura 13 se observa que la dominancia de una familia emergente sobre las demás fue mayor en sequía, agosto M1, predominó la familia Empididae con emergencia del 39% de los individuos del total capturado durante todo el periodo de estudio, mientras que en los demás muestreos se presentó la emergencia simultánea de varias familias sin el número de individuos



**Figura 13.** Dominancia total por muestreo.



**Figura 14.** Dominancia total por mes del periodo de estudio

tan elevado. Para la dominancia acumulada por mes figura 14, el mes de agosto presenta mas dominancia de especies, lo cual concuerda con la baja diversidad encontrada en agosto y con la baja diversidad en abril y mayo, meses en los cuales se presenta la mayor diversidad.

El método de similaridad basado en el análisis de agrupamiento de Bray-Curtist tiene un porcentaje de similitud del 100% a los datos que mas se asemejan, cerca del 65% se puede decir que la “zona de bosque ripario” y la “zona de bosque plantado se asemejan en cuanto a la emergencia de individuos; mientras que la “zona de pasto” no alcanza al 50% de similaridad con las otras dos zonas. Lo que indica que la falta de cobertura vegetal afecta la emergencia de insectos (Fig. 15).

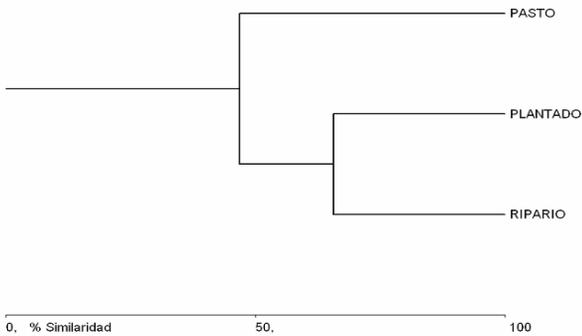


Figura 15. Esquema de agrupamiento de las zonas de estudio.

En la figura 16 se observa que sí hay diferencias significativas en las abundancias totales de las familias capturadas en los muestreos, lo cual puede ser debido a los sucesos de emergencia diferencial según el periodo climático  $F=2,616$  (10,1343)  $P=0,0037$  (Anexo de cálculos). Entre zonas también hay diferencias significativas  $F=2,616$  (10,1343)  $P=0,0036$  (Fig. 17). lo que indica que la vegeta-

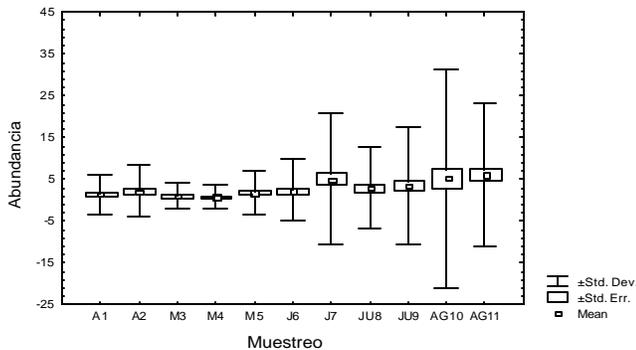


Figura 16. Comparación entre los meses de muestreo utilizando cajas esquemáticas para comparar desviación estándar, media y error.

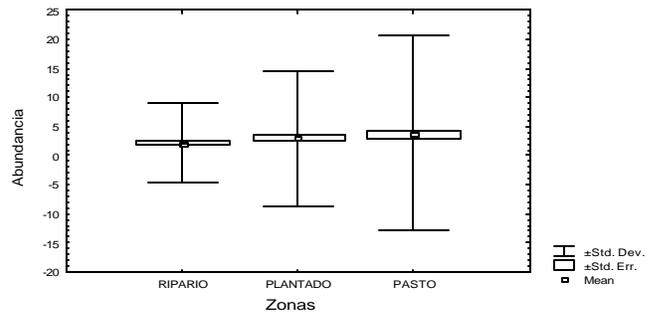


Figura 17. Comparación entre las zonas de muestreo utilizando cajas esquemáticas para comparar desviación estándar, media y error.

ción de ribera tiene algún efecto sobre la emergencia de insectos acuáticos. Los periodos de lluvia y sequía también marcan una diferencia significativa  $F=19,57$  (1,1352)  $P=1,048E-5$  (Figura 18). mayor emergencia en los tiempos de lluvia. Se puede decir que hay mayor variabilidad en la emergencia en la “zona de pasto”, seguida de la “zona de bosque plantado” y la “zona de bosque ripario” es menor variable en su abundancia.

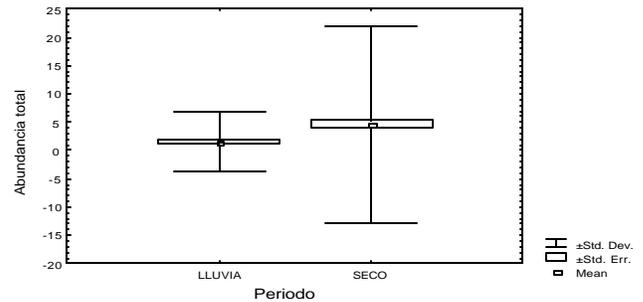


Figura 18. Comparación en la abundancia de emergencia entre épocas de lluvia y sequía utilizando caja esquemática.

### Análisis de emergencia por zona

#### Zona A (bosque ripario)

En total se capturaron 1021 insectos pertenecientes a siete ordenes y 33 familias. La figura 19 muestra los adultos más representativos capturados. El orden Diptera fue él más abundante 97% los restantes distribuidos así: Trichoptera 2.1%, Plecoptera 0.1%, Hymenoptera 0.2%, Lepidoptera 0.1%, Coleoptera 0.4% y Hemiptera 0.09%. Estos resultados son similares a los obtenidos por Wolfet al. (1988).

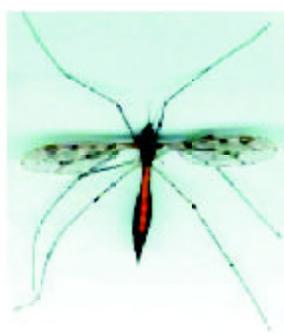
La única familia que emergió durante todo el periodo de estudio fue Tipulidae que solo corresponde al 1.4 % de los insectos que emergieron continuamente durante



Diptera: Simuliidae



Diptera: Tabanidae



Diptera: Tipulidae



Diptera: Tabanidae



Odonata: Coenagrionidae



Coleoptera: Gyrimidae



Hymenoptera: Braconidae



Hymenoptera: Ichneumonidae



Trichoptera: Calamoceratidae



Trichoptera: Psychomyiidae



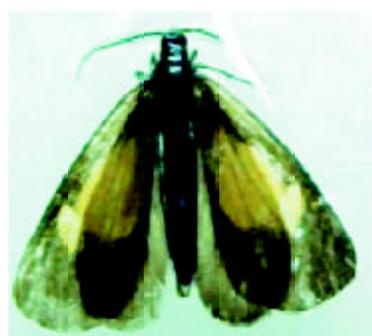
Diptera: Tipulidae



Diptera: Tabanidae



Diptera: Dolichopodidae



Lepidoptera: Noctuidae



Plecoptera: Perlidae

**Figura 19.** Insectos acuáticos adultos capturados en las trampas.

todo el periodo de estudio; su pico de emergencia se presentó en el mes de junio con 27 individuos. La familia Cecidomyiidae que aunque no emergió durante todo tiempo, es muy representativa con el 2.4% que es el mayor porcentaje de individuos de todas las familias encontradas; sus picos de emergencia se presentaron en junio y agosto.

Las familias menos abundantes fueron: Simuliidae, Sciomyiidae y Perlidae, todos con un solo individuo durante el periodo de muestreo.

Para la zona de “bosque ripario” el mayor número de emergencia de insectos (abundancia) se presentan la segunda quincena de junio (transición) y la segunda de agosto (sequía).

### **Zona B (bosque plantado)**

En esta zona se capturaron 1382 individuos, 5 órdenes y 32 familias en donde el orden Diptera tuvo el mayor porcentaje de emergencia con 95.7% y seguido por los órdenes, Trichoptera 1.7%, Odonata 1.5%, Lepidoptera 0.6% e Hymenoptera 0.4%.

La familia Cecidomyiidae se presentó durante todo el estudio y fue la de más alto porcentaje de emergencia con 40.2%; Entre junio y agosto fue cuando mayor número de individuos emergieron. Otras familias como Chironomidae, Ceratopogonidae, Dolichopodidae y Tipulidae solo estuvieron ausentes en un solo muestreo; para estas familias entre junio y agosto se presenta la mayor emergencia. Estas familias constituyen el 70.6% del total de familias capturadas. Las familias Curculionidae, Hydrophilidae y Pyralidae son las que menos emergieron que solo se capturó un individuo por familia durante todo el estudio.

### **Zona C (Pasto)**

En esta zona se capturó el mayor número de individuos (1719) agrupados en 5 órdenes y 36 familias. Nuevamente los dípteros, como en las dos estaciones anteriores es el grupo más rico en familias.

Para esta estación no hubo ninguna familia que emergiera de una forma continua durante todo el periodo de estudio, pero si hubo unas muy representativas en algunas épocas como: Calliphoridae entre mayo y julio, Cecidomyiidae julio y agosto, Dolichopodidae; esta familia estuvo ausente solo en una ocasión en abril y sus picos de emergencia entre los meses de mayo y agosto. La familia Empididae fue la más representativa

en cuanto a porcentaje de individuos presentes (36%) del total y entre julio y agosto emergieron el mayor número de individuos.

Las familias Bibionidae, Dryopidae, Ephydriidae, Tachinidae y Odontoceridae (Trichoptera) con un solo individuo durante todo el periodo de estudio; en esta zona fue en donde más Lepidopteros emergieron 35 en total y en tiempo de bajas lluvias.

### **Conclusiones**

En las tres zonas la calidad del agua presenta un estado natural, sin contaminación según lo observado en los datos fisicoquímicos.

La “zona de pasto” es la que más temperaturas altas se presentan, y al mismo tiempo mayor abundancia de emergencia de individuos.

Hay mayor diversidad de emergencia de insectos en periodo de lluvias y mayor dominancia de individuos en emergencia en los periodos secos.

Hay influencia de la vegetación de ribera en la emergencia de insectos acuáticos; la “zona de bosque ripario” fue la más diversa mientras que la “zona de pasto” es la menos diversa.

En las tres zonas el orden Diptera fue el más diverso y abundante.

Las familias Cecidomyiidae, Dolichopodidae y Tipulidae son las familias más representativas durante todo el estudio; se puede decir que emergieron durante todo el periodo de estudio.

Familias como Anthomyiidae, Ceratopogonidae, Dixidae, Noctuidae, Pyralidae, Sciomyidae y Stratiomyiidae, emergieron solamente en tiempo de lluvia.

Familias como Sarcophagidae, Leptoceridae, Braconidae, Muscidae y Anthomyiidae, emergieron solamente en tiempo de verano.

### **Agradecimientos**

Agradecemos al Sistema de Investigación y Desarrollo de la Universidad Católica de Oriente por su apoyo económico para la realización del presente estudio; al profesor José Rincón por su aportes en la clasificación de los especímenes adultos y a Luisa Fernanda Alvarez por su colaboración en la presentación final de este documento.

## Referencias bibliográficas

- Álvarez, L.F y G. Roldán**, 1983. Estudio del orden Hemiptera (Heteroptera) en el departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. *Actual. Biol.* **12** (44): 31-45.
- Andreazze, R. y V. Daniel**, 2002. Influencia do factores climáticos no atividade hematofagica de *Psaroniocompa incrustata* vector de *Onchoceria volulus*. *Rev. Entomológica y Vectores. Brasil:* **9** (4): 559-557.
- Arango, M.C y G. Roldán**, 1983. Odonatos inmaduros del departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. *Actual. Biol.* **12** (46): 91-104.
- Barbour, M.T. y J. Stribling**, 1991. Use of habitat assessment in evaluating the biological integrity of stream communities. In: G. Gibson, Ed, *Biological Criteria*. Arlington, Virginia. **199**: 25-38.
- Barrientos, I.A.**, 1988. Bases para un curso práctico de entomología. Editoriado por la Asociación Española de Entomología. Salamanca, España. pág. 754.
- Baumann, R.W.**, 1982. Plecoptera. in: *Aquatic biota of Mexico, Central America and the West Indies*. S.H. Hurlbert y A. Villalobos-Figueroa (Eds). San Diego State University, San Diego, California. pág. 278-279.
- Brittain, J.E.**, 1990. Life histories strategies in Ephemeroptera and Plecoptera. En: Campbell (Ed). *Mayflies and stoneflies: life history and biology*. kluwer academic publishers. pág 1-12.
- Borror, S. D.**, 1976. Introduction to the study of insects. Four edition. pág. 852.
- Carballo Abreu, I.R.**, 1990. "The influence of chemical composition and age of caribaea pine wood (*Pine caribaea*) on the physical and mechanical properties as well as on the yield of sulfate pulp.", Tesis presentada en opción al grado científico de Dr. en Ciencias, Zvolen.
- Corbet, P.S.**, 1964. Temporal patterns of emergence in aquatic insects. *Canadian Entomology*, **96**: 264-279.
- Correa, M. Machado, Ty G. Roldán**, 1981. Taxonomía y ecología del orden Trichoptera en el departamento de Antioquia en diferentes pisos altitudinales. En: *Actual. Biol.* **10** (36): 35-48.
- Dittmar, H.**, 1955. Ein sauber landbach. *Arch. Hydrobiologica.* **50**: 305-552.
- Elster, C.**, 1998. Posibilidades de regeneración del manglar en la zona de la ciénaga Grande de Santa Marta (Colombia). Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Eschborn. Pág. 68.
- Flint, O.S. JR.**, 1978. Studies of Neotropical caddisflies, XXII: Hydropsychidae of the Amazon Basin (Trichoptera). *Amazoniana.* **6**: 373-421.
- Frank, J. H.**, 1983. Bromeliad phytotelmata and their biota, especially mosquitos. In: H. Frank & P. L. Lounibos (eds). *Plexus Inc.* New Yersy. Pág. 101-103.
- Halffter, G. y Ezcurra, E.**, 1991. ¿Qué es la Biodiversidad? En: *La Diversidad Biológica de Iberoamérica*, pp. 3-24. *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.). Volumen especial de 1992. G. Halffter compilador. CYTED-D, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. México D. F. Pág. 389.
- Hawkins, B. A. y J.H. Lawton**, 1987. Species richness for parasitoids of British phytophagous insects. *Nature*, **326**. Pág. 788-790.
- Holdridge, L.**, 1978. Ecología basada en las zonas de vida. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Costa Rica.
- Holzenthal, R.W.**, 1988. Studies in Neotropical Leptoceridae (Trichoptera), VIII: the genera *Anatolica* Mosely and *Grumichella* Müller (Triplectidinae: Grumichellini). *Transactions of the American Entomological Society.* **114**: 71-128.
- Hutchinson, G. E.**, 1981. Thoughts on aquatic insects. En *BioScience*, **31**: 495-500.
- Illies, J.**, 1969. Retardierte schupfzeiten von *Baetis*-Gelegen (Insecta Ephemeroptera) *Naturwissensch.* **46**: 119-120.
- \_\_\_\_\_. 1975. A new attemp to estimate production in running waters. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* pág 1705-1711.
- \_\_\_\_\_. 1977. A possible explanation of emergence patterns of *Baetis vernus* Curtis (Ephemeroptera) on the Breintenbach schlitz studies on productivity. *Int. Revue Ges. Hydrobiol.* **62** (2): 315-321.
- \_\_\_\_\_. 1972. Emergence control, a new metod for productivity studies in running waters. *Verein. Dtsch. Zool. Ges.* pág 65-68.
- \_\_\_\_\_. 1971. Emergence on Briten bach (Schlitz studies on productivity, N° 1). *Limnologische Flubstation Schlitz, Aubenstelle des M P I für Limnologie.* **69** (1): 14-59.
- Lasalle, J. & I.D Gauld**, 1993. Hymenoptera and Biodiversity. C.A.B. International. Wallingford. (eds). Pág. 348.
- Maccafferty, P y A.V. Provnsha**, 1981. *Aquatic Entomology*. Science Books int. Boston, Massachusetts. Pág 448.
- Matthias, U.**, 1982. Der einfluss der wasserstoffionenkonzentration aufdie zusammensetzung von bergbachbiozönosen, Dargestellt an einigen Mittelgebirgsbächen des kaufunger waldes. Tesis de doctorado, Universität des Landes Hessen, Kassel, Alemania.
- Mckie, B. G. L. y P. S. Cranston**, 1998. ¿Coleopterans trapezoidales? Colonización por los elmids de madera-alimentacio'n de maderas experimental sumergidas en Australia south-eastern. *Investigación marina y de agua dulce.* **49**: 79-88.
- Merrit, R; K. Cummins**, 1996. An introduction to the Aquatic Insects of North America. Third edition. Department of Entomology. Michigan. Pág 862.
- Nebeker, A. V.**, 1971. Effect of temperature at different altitudes on the emergence of aquatic insects from a single stream (Ple.). *Journal of Kansas Entomological Society*, **44** (1): 26-35.
- Plafkin, J.L ; M.T. Barbour y K.D. Porter**, 1989. Rapid bioassessment protocols for use in stream and rivers: Benthic macroinvertebrates and fish. Washigton, D.C.
- Richarson, B. A.**, 1999. The bromeliad microscom and the assessment of fauna diversity in a neotropical forest. *Biotropica.* **31**: 321-336.
- Rincón, M.E.**, 2002. Comunidad de insectos acuáticos en la quebrada mamarramos (Boyacá, Colombia). *Revista Colombiana de Entomología* **28** (1): 101-108.
- Roldán, G., J. Builes, C.M. Trujillo y A. Suárez**, 1973 Efectos de la Contaminación Industrial y doméstica sobre la fauna béntica del río Medellín. *Actual. Biol.* **2** (5): 54-64.

- Roldán, G.** 1988. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Dpto de Antioquia. Fondo FEN. Colombia – Colciencias – Universidad de Antioquia. Pág 217. Bogotá.
- Roldán, G.** 1992. Fundamentos de limnología tropical. Editorial universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Pág. 403.
- \_\_\_\_\_, **J.A. Posada y J.C. Gutiérrez**, 2001. Estudio limnológico de los recursos hídricos del Parque Piedras Blancas. Rev. Acad. Col. Cien, Exact. Fisc. Nat. Colección Jorge Álvarez Lleras, No. 9, 152.
- Roldán, G.**, 2003. Bioindicación de la calidad del agua en Colombia- Uso del método BMWP/Col. Ed. Universidad de Antioquia, Medellín.
- Saeten, M. y Britain, J. E.** 1985. Life cycles and emergence of Ephemeroptera and Plecoptera from Myrkdalsvatn, an oligotrophic lake in western Norway. *Aquatic Insects*, **7** (4): 229-241.
- Statzner, V.B.** 1976. The emergence of the caddisflies (Trichoptera Insecta) from the Central African mountain stream kalengo. *Aus. Dem Zoologischen Institut der Universitat Kied*; Pág 102-137.
- Sweeney, B. W.** 1984. Factors influencing life-history patterns of aquatic insects. En: Resh & Rosenberg (ed). *Ecology of Aquatic Insects*. Praeger Publishers. Pág. 56-100.
- Trabanino, R.** 1998. Guía para el manejo integrado de plagas invertebradas. Tegucigalpa, Honduras, Escuela Panamericana. Pág 157.
- Wolf, M., U. Matthias y G. Roldán**, 1988. Estudio del desarrollo de los insectos acuáticos, su emergencia y ecología en tres ecosistemas diferentes en el departamento de Antioquia. *Actual. Biol.* **17** (63): 2-27.

Recibido: noviembre 10 de 2006

Aceptado para su publicación: marzo 7 de 2008