

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

LA ACADEMIA ES ORGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XX

MARZO DE 1996

NUMERO 76

DIRECTOR DE LA REVISTA: SANTIAGO DIAZ-PIEDRAHITA



## CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
<b>Nota Editorial</b> (Editorial) .....	5	Efectos del terremoto del 6 de junio de 1994, en la región al oriente de Silvia, Cauca, Colombia. (Effect of the June 6, 1994 earthquake on the eastern region of Silvia, Cauca Department, Colombia) <i>Jairo Mojica</i> .....	71
<b>Astronomía</b> (Astronomy)		<b>Física</b> (Physics)	
Influencia de los errores de los movimientos propios en el análisis de la pertenencia de estrellas a cúmulos abiertos. Aplicación al cúmulo NGC2287. (Impact of movement errors on the analysis of star membership in open clusters. A discussion regarding cluster NGC2287). <i>Eduardo Brieva Bustillo &amp; Antonio Uribe Botero</i> .....	7	Nueva inflación y restricciones al potencial efectivo de SU (5) (New inflation and constraints to the SU (5) effective potential). <i>Alexis de Greiff &amp; Juan Manuel Tejero</i> .....	93
Integración analítica de las ecuaciones de movimiento de un satélite perturbado por los armónicos sectoriales $J_{22}$ y $K_{22}$ en términos de la transformación KS. (Analytical integration of movement equations of a satellite perturbed by sectorial harmonics $J_{22}$ and $K_{22}$ in terms of the KS transformation). <i>José Gregorio Portilla B.</i> .....	15	<b>Historia de la Ciencia</b> (History of Science)	
El problema de los dos cuerpos y el problema principal del satélite artificial en ecuaciones diferenciales de primer orden. (Two body and main satellite problems in differential equations of first order) <i>José Gregorio Portilla B.</i> .....	25	Notas para la biografía de cuatro botánicos bogotanos del siglo XIX. (Biographical notes about four XIX century botanists from Bogotá) <i>Santiago Díaz-Piedrahita</i> .....	111
<b>Bioquímica</b> (Biochemistry)		<b>Zoología</b> (Zoology)	
Human tumor respiration (Respiración del tumor humano) <i>Carlos Corredor, Cecilia de Plata, Jorge Badel &amp; Julio César Montoya</i> .....	33	Aspectos de la dinámica poblacional de jaibas <i>Callinectes sapidus</i> y <i>C. bocourti</i> de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano (Crustacea: Decapoda: Portunidae) (Notes on the population dynamics of swimming crabs <i>Callinectes sapidus</i> and <i>C. bocourti</i> from the Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribbean region of Colombia) <i>Marta José Valencia &amp; Néstor Hernando Campos</i> .....	121
<b>Botánica</b> (Botany)		A historical perspective to <i>Simulium (Ectemnaspis)</i> and <i>Simulium (Psilopelmia)</i> limits. (Una perspectiva histórica a los límites entre <i>Simulium (Ectemnaspis)</i> y <i>Simulium (Psilopelmia)</i> . <i>Daniel Rafael Miranda Esquivel &amp; Paulina Muñoz de Hoyos</i> .....	131
Pteridófitas epífitas de la franja subandina del departamento de Cundinamarca, Colombia (Epiphytic Pteridophytes in lower montane forests, Cundinamarca, Colombia) <i>Eduardo Barrera T., Angela Chaparro de Barrera &amp; Marta Teresa Murillo</i> .....	47	<i>Simulium (Grenieriella) sumapazense</i> Coscarón & Py-Daniel (Diptera: Simuliidae). Descripción del adulto y larva. Redescipción de la pupa. ( <i>Simulium (Grenieriella) sumapazense</i> Coscarón & Py-Daniel (Diptera: Simuliidae). Description of the adult and larva and redescription of the pupa). <i>Paulina Muñoz de Hoyos</i> .....	141
Desmidioflórida de los lagos marginales del río Amazonas en Colombia (Desmid florula in marginal lakes in the Amazon river, Colombia). <i>Santiago R. Duque &amp; John Ch. Donato</i> .....	57	<b>Vida Académica</b> (Academic life) .....	149
<b>Ciencias de la Tierra</b> (Earth Sciences)		<b>Constitución de la Academia</b> (Constitution of the Academy) .....	155
El método de Caldas para medir la elevación de las montañas (Caldas method to measure mountain altitude) <i>Jorge Arias de Greiff</i> .....	63		

# INFLUENCIA DE LOS ERRORES DE LOS MOVIMIENTOS PROPIOS EN EL ANALISIS DE LA PERTENENCIA DE ESTRELLAS A CUMULOS ABIERTOS. APLICACION AL CUMULO NGC2287

por<sup>1</sup>

Eduardo Brieva Bustillo<sup>2</sup> & Antonio Uribe Botero<sup>3</sup>

## Resumen

**Brieva Bustillo, E. & A. Uribe Botero:** Influencia de los errores de los movimientos propios en el análisis de la pertenencia de estrellas a cúmulos abiertos. Aplicación al cúmulo NGC2287. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20**(76): 7-14, 1996. ISSN 0370-3908.

Se analiza la incidencia de los errores accidentales de los movimientos propios en la determinación de la pertenencia de estrellas a cúmulos galácticos. El modelo utiliza una distribución bivariada mixta que incluye el coeficiente de correlación. Sus parámetros se determinan por el método de máxima verosimilitud, resolviendo un sistema de catorce ecuaciones no lineales con constricciones sobre el porcentaje de estrellas pertenecientes al cúmulo, sobre las varianzas del modelo y sobre el coeficiente de correlación. Se presenta una aplicación al cúmulo abierto NGC2287 y se comparan los resultados con los obtenidos si no se tienen en cuenta los errores accidentales.

**Palabras claves:** Cúmulos abiertos-pertenencia-movimientos propios.

## Abstract

The incidence of accidental errors of proper motion data in the solution of the stellar membership to open clusters is analysed. A mixed bivariate normal model with correlation coefficient is used. The parameters of this mixture are determined by the maximum likelihood method solving a fourteen non linear equation system with constraints on the correlation, the percentage of field stars and the standard deviations. The method is applied to solve the membership problem in the open cluster NGC2287 and a comparison with those membership results from proper motions without the consideration of accidental errors is made.

**Key Words:** Open clusters-membership-proper motions.

<sup>1</sup> El orden de los autores es sólo alfabético.

<sup>2</sup> Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 2584, Santafé de Bogotá. E.Mail:ebrieva@ciencias.campus.unal.edu.co

<sup>3</sup> Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 2584, Santafé de Bogotá. E.Mail:auribe@ciencias.campus.unal.edu.co

## Introducción

La pertenencia de estrellas a cúmulos abiertos a partir de los movimientos propios de las estrellas de una cierta región estelar ha sido analizada en detalle en Sanders (1971), Slovak (1977), Zhao *et al.* (1982), Cabrera y Alfaro (1985), Missana y Missana (1990), Lattanzi y Massone (1991) y en nuestras publicaciones: Brieva y Uribe (1985, 1990, 1994) y Uribe y Brieva (1994).

La influencia de los errores accidentales en los movimientos propios y en el estudio de la pertenencia es analizada de una manera directa en De Graeve (1979) y en Zhao *et al.* (1990); Missana y Missana (1994) tienen en cuenta la incidencia de tales errores de una manera indirecta al considerar el peso de los errores en el análisis de la pertenencia.

En este trabajo se incluye en el modelo el efecto de los errores observacionales de los movimientos propios (Brieva y Uribe, 1990), para lograr así una mayor precisión en la estimación de los parámetros de la función

$$\phi(\mu_x, \mu_y) = \frac{n_c}{2\pi\sigma_c^2} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[ \frac{(\mu_x - \mu_{xc})^2 + (\mu_y - \mu_{yc})^2}{\sigma_c^2} \right]\right\} + \frac{1-n_c}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \frac{(\mu_x - \mu_{xf})^2}{\sigma_{xf}^2} + \frac{(\mu_y - \mu_{yf})^2}{\sigma_{yf}^2} - 2\rho \frac{(\mu_x - \mu_{xf})(\mu_y - \mu_{yf})}{\sigma_{xf}\sigma_{yf}} \right]\right\} \quad (1)$$

En la estimación de los parámetros de la densidad mixta por el método de máxima verosimilitud, se logra un mayor rigor en las estimaciones si las varianzas del modelo se descomponen en una varianza intrínseca y un término de error observacional en los movimientos propios (Zhao *et al.*, 1990):

$$\sigma_c^2 = \sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_c^2$$

$$\phi(\mu_x, \mu_y) = \frac{n_c}{2\pi(\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_c^2)} \beta + \frac{1-n_c}{2\pi\sqrt{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf}^2}\sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf}^2}\sqrt{1-\rho^2}} \alpha \quad (3)$$

en donde:

$$\beta = \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[ \frac{(\mu_x - \mu_{xc})^2 + (\mu_y - \mu_{yc})^2}{(\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_c^2)} \right]\right\} \quad (4)$$

$$\alpha = \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \frac{(\mu_x - \mu_{xf})^2}{(\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf}^2)} + \frac{(\mu_y - \mu_{yf})^2}{(\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf}^2)} - 2\rho \frac{(\mu_x - \mu_{xf})(\mu_y - \mu_{yf})}{\sqrt{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf}^2}\sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf}^2}} \right]\right\} \quad (5)$$

En estas ecuaciones  $\mu_{xc}$ ,  $\mu_{yc}$ ,  $\mu_{xf}$ ,  $\mu_{yf}$  son los centros de las distribuciones del cúmulo y del campo;  $n_c$  y  $1-n_c = n_f$ , son los porcentajes de las estrellas del

de densidad del modelo bivariado mixto, en la determinación de las probabilidades de pertenencia y en la posterior adscripción al cúmulo de las estrellas que le pertenecen.

## El modelo

Vasilevskis *et al.* (1958), Sanders (1971), Slovak (1977), emplean para determinar la pertenencia un modelo de función de densidad bivariada mixta de los movimientos propios  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ , que es la superposición de dos densidades normales bivariadas, una elíptica para las estrellas del campo, y una circular para las estrellas del cúmulo. En Brieva y Uribe (1990) se extiende el modelo de Vasilevskis *et al.* y se incluye el coeficiente de correlación de la densidad elíptica. La segregación entre los miembros del cúmulo y los del campo se analiza, en el caso de movimientos propios determinados con gran precisión, partiendo del modelo:

$$\begin{aligned} \sigma_{xf}^2 &= \sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf}^2 \\ \sigma_{yf}^2 &= \sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

en donde  $\sigma_c^2$ ,  $\sigma_{xf}^2$ ,  $\sigma_{yf}^2$ , son las varianzas observadas;  $\sigma_{c_0}^2$ ,  $\sigma_{xf_0}^2$ ,  $\sigma_{yf_0}^2$  son las varianzas intrínsecas, y  $\varepsilon_c^2$ ,  $\varepsilon_{xf}^2$ ,  $\varepsilon_{yf}^2$  representan términos de error.  $\varepsilon_c$  se calcula como el promedio de  $\varepsilon_x$  y  $\varepsilon_y$ . El modelo de función bivariada mixta que incluye los errores ya mencionados, es pues:

cúmulo y del campo ( $1-n_c = n_f$ ) y  $\rho$  es el coeficiente de correlación de la distribución elíptica.

Las razones que justifican este modelo pueden verse en **Brieva y Uribe (1994)**. Allí mismo se explica cómo estimar los parámetros de la distribución bivariada mixta utilizando el método de máxima verosimilitud, si se incluyen las constricciones sobre las desviaciones estándar, la correlación y el porcentaje de estrellas pertenecientes al cúmulo. Siguiendo esta metodología y teniendo en

cuenta que los errores observacionales varían de estrella a estrella, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones no lineales, en donde  $\mu_{x_i}, \mu_{y_i}$  son las componentes del movimiento propio por siglo para la estrella  $i$ -ésima,  $N$  es el número total de estrellas de la región con movimiento propio conocido, y  $\varepsilon_i$  los errores observacionales en los movimientos propios:

$$\sum_{i=1}^N \frac{1-n_c}{1-\rho^2} F_A \left[ (\mu_{x_i} - \mu_{xf}) - \frac{\rho \sqrt{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2}}{\sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}} (\mu_{y_i} - \mu_{yf}) \right] = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{1-n_c}{1-\rho^2} F_A \left[ \frac{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2}{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2} (\mu_{y_i} - \mu_{yf}) - \frac{\rho \sqrt{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2}}{\sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}} (\mu_{x_i} - \mu_{xf}) \right] = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{(1-n_c)\sigma_{xf_0}}{1-\rho^2} F_A \left[ \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{xf})^2}{(\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2)} - \rho \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{xf})(\mu_{y_i} - \mu_{yf})}{\sqrt{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2} \sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}} - (1-\rho^2) \right] = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{(1-n_c)\sigma_{yf_0}}{1-\rho^2} F_A \left( \frac{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2}{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2} \right) \left[ \frac{(\mu_{y_i} - \mu_{yf})^2}{(\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2)} - \rho \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{xf})(\mu_{y_i} - \mu_{yf})}{\sqrt{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2} \sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}} - (1-\rho^2) \right] = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N n_c \sqrt{1-\rho^2} F_B \left[ \frac{(\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}}{(\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_{c_i}^2)^2} (\mu_{x_i} - \mu_{xc}) \right] = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N n_c \sqrt{1-\rho^2} F_B \left[ \frac{(\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}}{(\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_{c_i}^2)^2} (\mu_{y_i} - \mu_{yc}) \right] = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N n_c \sigma_{c_0} \sqrt{1-\rho^2} \frac{(\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}}{(\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_{c_i}^2)^2} F_B \left[ \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{xc})^2 + (\mu_{y_i} - \mu_{yc})^2}{(\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_{c_i}^2)} - 2 \right] = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N \sqrt{1-\rho^2} \left[ \frac{(\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}}{(\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_{c_i}^2)} F_B - \frac{(\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2) F_A}{\sqrt{1-\rho^2}} \right] = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{(1-n_c)}{(1-\rho^2)^2} F_A (\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2) \left\{ \rho(1-\rho^2) - \rho \left[ \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{xf})^2}{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2} + \frac{(\mu_{y_i} - \mu_{yf})^2}{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2} \right] + (1+\rho^2) \frac{(\mu_{x_i} - \mu_{xf})(\mu_{y_i} - \mu_{yf})}{\sqrt{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{xf_i}^2} \sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{yf_i}^2}} \right\} = 0$$

$$\sigma_{xf_0} - \lambda_1^2 = 0 \quad (15)$$

$$\sigma_{c_0} - \lambda_3^2 = 0 \quad (17)$$

$$\sigma_{yf_0} - \lambda_2^2 = 0 \quad (16)$$

$$n_c - \lambda_4^2 = 0 \quad (18)$$

$$(1 - \rho^2) - \lambda_5^2 = 0 \quad (19)$$

en donde:

$$F_A = \frac{\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_{c_i}^2}{[n_c \sqrt{\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{x_f}^2} \sqrt{\sigma_{yf_0}^2 + \varepsilon_{y_f}^2} \sqrt{1 - \rho^2} F + (1 - n_c)(\sigma_{c_0}^2 + \varepsilon_{c_i}^2)](\sigma_{xf_0}^2 + \varepsilon_{x_f}^2)} \quad (20)$$

$$F_B = F F_A$$

$$F = \frac{\beta}{\alpha}$$

Las ecuaciones del sistema se obtienen por el método de máxima verosimilitud y las primeras nueve están asociadas, respectivamente, a los parámetros de la función de densidad mixta,  $\mu_{xf}$ ,  $\mu_{yf}$ ,  $\sigma_{xf_0}$ ,  $\sigma_{yf_0}$ ,  $\mu_{xc}$ ,  $\mu_{yc}$ ,  $\sigma_{c_0}$ ,  $1 - n_c$  y  $\rho$ . Los  $\lambda_i$ ,  $i=1, \dots, 5$ , son incógnitas que deben introducirse al resolver un sistema con constricciones usando multiplicadores de Lagrange (Hancock, 1917; Brieva y Uribe, 1994).

### Pertenencia en la región del cúmulo NGC2287

En la figura 1 se muestra el diagrama de dispersión de los movimientos propios en la región del cúmulo NGC2287. Para cada estrella con componentes de movimiento propio  $\mu_{x_i}$ ,  $\mu_{y_i}$ , la probabilidad de pertenencia al cúmulo  $P_i$ , se calcula mediante el criterio Bayesiano de pertenencia (Brieva y Uribe, 1985):

$$P_i = \frac{n_c \phi_c(\mu_{x_i}, \mu_{y_i})}{n_c \phi_c(\mu_{x_i}, \mu_{y_i}) + (1 - n_c) \phi_f(\mu_{x_i}, \mu_{y_i})} \quad (21)$$

en donde  $\phi_c$  y  $\phi_f$  son, respectivamente, las funciones de densidad estimadas del cúmulo y del campo. La solución numérica requiere de un proceso iterativo. Para ello se elaboró un programa en Fortran llamado **Clusterce**, que usa la subrutina **Zsystm**, gentilmente facilitada por el Dr. Mark Slovak, depura los datos según una variante de la técnica de Zhao *et al.* (1982) descrita en Brieva y Uribe (1990), y asigna a cada estrella su probabilidad de pertenencia, la cual puede leerse en la tabla 2. En esta tabla se consignan también los resultados para las probabilidades de pertenencia obtenidos sin tener en cuenta los errores accidentales de los movimientos propios.

### Discusión

Una comparación de las figuras 2, 3 y 4 permite resaltar las diferencias y las semejanzas entre varios métodos para asignar probabilidades de pertenencia a las estrellas de la región de un cúmulo abierto. En la figura 1 se muestra la función de densidad de la probabilidad P1 la cual se obtiene teniendo en cuenta los errores accidentales en los movimientos propios, tal como se analiza en este artículo. En la figura 2 se observa la función de densidad para la probabilidad P2 calculada según el método utilizado por Brieva y Uribe (1990), el cual asigna probabilidades de pertenencia resolviendo un sistema no lineal de 9 ecuaciones obtenido por el método de máxima verosimilitud sin eliminar el coeficiente de correlación del modelo bivariado mixto. En la figura 3 se muestra la función de densidad de la probabilidad P3 calculada por Ianna *et al.* (1987) siguiendo el modelo usual propuesto por Vasilevskis *et al.* (1958) que utiliza una función de densidad bivariada mixta, cuyos parámetros -sin incluir el coeficiente de correlación-, se estiman por el método de máxima verosimilitud (Sanders, 1971; Slovak, 1977; Brieva y Uribe, 1985).

La comparación de P1, P2, P3, muestra que estas densidades no son coincidentes aunque tienen un poder de discriminación parecido en los rangos de baja probabilidad y de alta probabilidad de pertenencia. Las pequeñas diferencias de las densidades anteriores se tornan cruciales cuando se analiza de manera singular cuáles estrellas contribuyen nominalmente en el rango de alta y de baja probabilidad, como cuando se desea discernir si una estrella gigante o una estrella cefeida particular es o no un miembro del cúmulo. Es entonces cuando puede considerarse de importancia la metodología desarrollada

en este artículo, ya que se sigue un procedimiento más riguroso al tener en cuenta la contribución de los errores accidentales. Así, si se consideran miembros aquellas estrellas con probabilidad mayor o igual que 0.50, según el valor de P1 habría que incluir como miembros las ocho estrellas 12, 16, 24, 54, 68, 73, 86, 128, 142.

Vale la pena destacar también que el método aquí desarrollado parece discriminar mejor las poblaciones de cúmulo y campo que el procedimiento seguido por

Green (Cudworth, 1984), que, aunque tiene en cuenta también los errores en los movimientos propios no siempre logra la separación de las dos poblaciones en estudio, como puede apreciarse en la aplicación que Ianna *et al.* hicieron del método de Green para analizar la pertenencia en el cúmulo NGC2287 (Ianna *et al.*, 1987).

Todas las estrellas usadas por Ianna como estrellas de referencia, tienen altísima probabilidad en los tres estudios, P1, P2, P3. Las estrellas, 50, 61, 65, 66, 80,

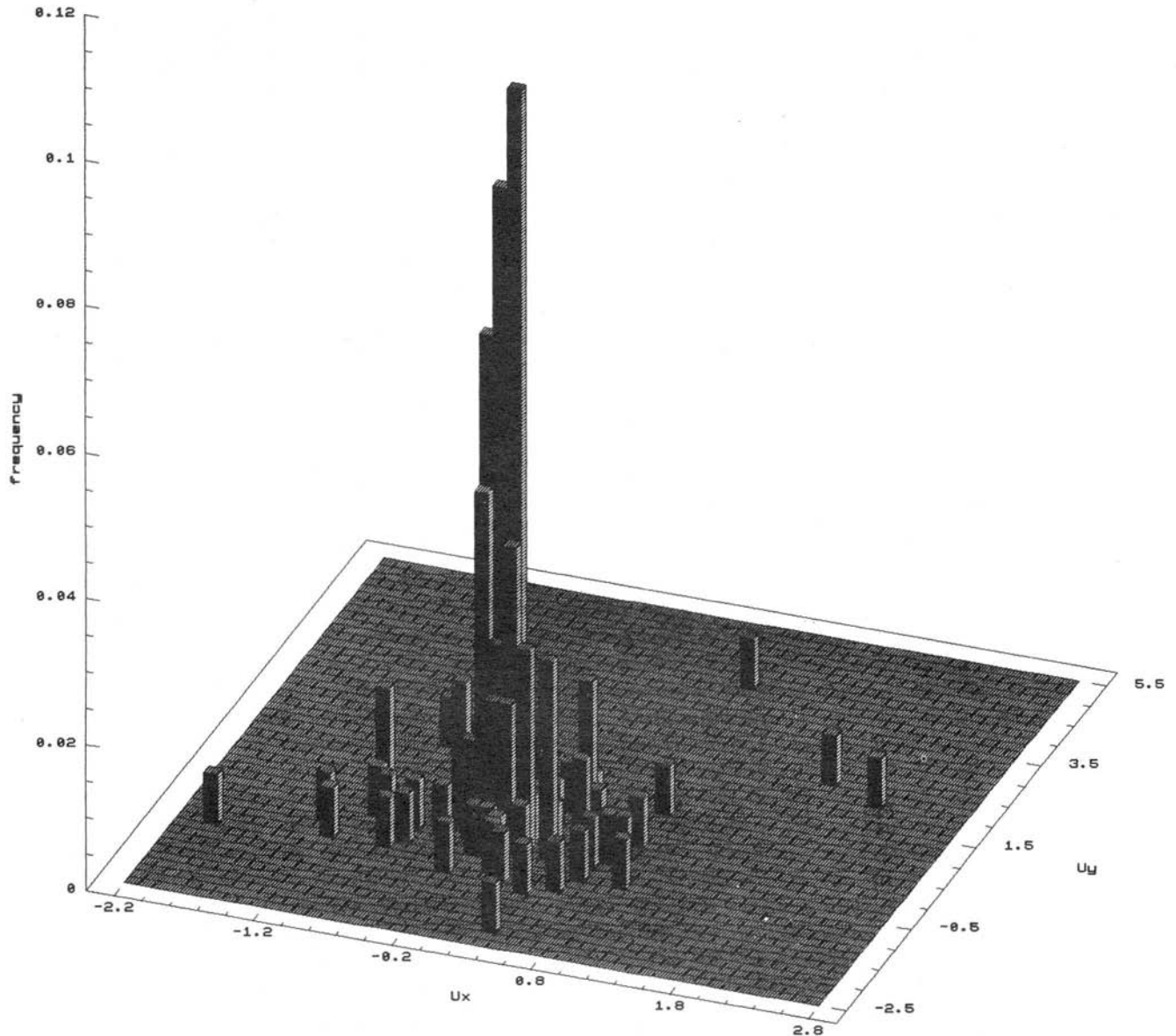


Figura 1. Función de densidad bivariada de los movimientos propios  $m_x$ ,  $m_y$  en segundos de arco por año indicados en la tabla 1. El diagrama emplea 2500 celdas y se ha obtenido usando el programa STATG. Los datos han sido tomados de Ianna *et al.* (1987).

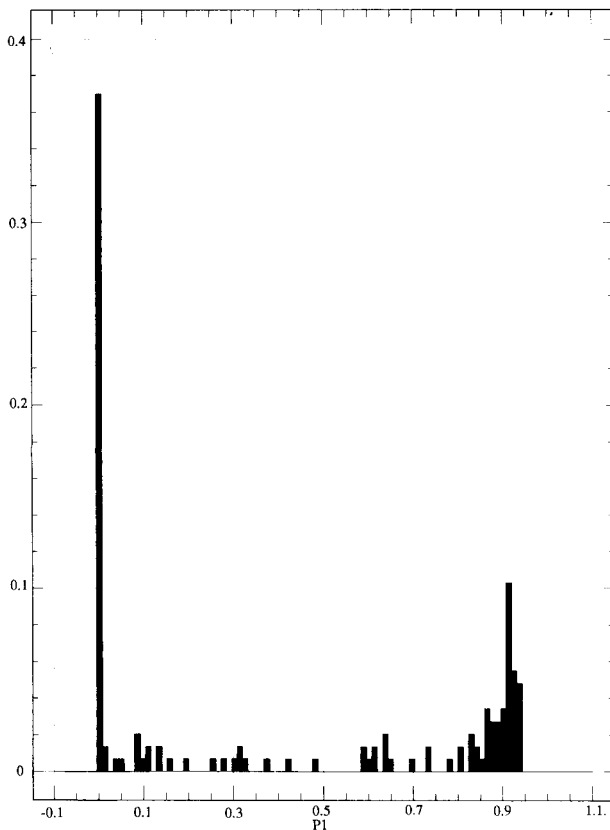
**Tabla 1.** Movimientos propios  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  y errores observacionales  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ , para cada una de las estrellas consideradas en la región del cúmulo abierto NGC2287. P1 representa la probabilidad de pertenencia según este estudio; P2, la probabilidad según Brieva y Uribe (1990). P3 asigna probabilidades según el estudio de Ianna *et al.* (1987). El \* indica cuales estrellas fueron excluidas por Ianna *et al.*, por imprecisión de los movimientos propios, o por un proceso de depuración que elimina del estudio aquellas estrellas con movimientos propios muy grandes: se les asigna probabilidad nula de ser miembros del cúmulo

N	$\mu_x$	$\epsilon_x$	$\mu_y$	$\epsilon_y$	P1	P2	P3	N	$\mu_x$	$\epsilon_x$	$\mu_y$	$\epsilon_y$	P1	P2	P3
1	.42	.29	.42	.17	.25	.00	.00	74	-.14	.08	-.13	.05	.88	.87	.88
2	.04	.07	-.02	.17	.92	.91	.91	75	-.15	.07	-.21	.09	.68	.70	.72
3	-1.19	.09	-.65	.07	.00	.00	.00 *	76	-.06	.09	-.19	.14	.86	.83	.84
4	-.32	.10	.34	.07	.00	.00	.00	77	-.13	.08	-.13	.09	.90	.88	.89
5	-.03	.09	.23	.11	.69	.37	.38	78	-1.00	.05	.60	.05	.00	.00	.00 *
6	2.20	.17	2.01	.15	.00	.00	.00 *	79	-.10	.06	-.18	.06	.79	.84	.85
7	.10	.08	-.81	.07	.00	.00	.00	80	-.10	.05	.01	.03	.97	.93	.92
8	.13	.21	.43	.08	.15	.00	.00	81	-.01	.04	-.04	.02	.98	.93	.93
9	-.06	.09	-.35	.06	.05	.13	.18	82	.72	.10	4.07	.15	.00	.00	.00 *
10	.04	.06	-.02	.05	.95	.91	.92	83	-.07	.04	-.04	.05	.98	.94	.94
11	.13	.14	-.15	.08	.77	.64	.68	84	.07	.05	-.11	.06	.87	.86	.87
12	.12	.12	.21	.08	.54	.20	.21	85	.06	.05	.01	.13	.93	.89	.89
13	.04	.12	.78	.07	.00	.00	.00	86	.00	.06	.31	.23	.60	.05	.06
14	.67	.08	-.33	.06	.00	.00	.00	87	.51	.07	-.14	.07	.00	.00	.00
15	-.40	.11	1.21	.07	.00	.00	.00 *	88	.00	.05	.09	.04	.93	.87	.87
16	.07	.12	-.28	.11	.55	.32	.41	89	.04	.04	.01	.03	.96	.91	.91
17	.19	.07	-.24	.06	.03	.13	.17	90	.02	.03	.05	.04	.95	.90	.90
18	.06	.62	.75	.57	.62	.00	.00	91	-.16	.10	-.16	.10	.85	.81	.82
19	.75	.18	-.16	.11	.00	.00	.00	92	.42	.17	.55	.10	.00	.00	.00
20	.02	.10	-.06	.07	.94	.92	.92	93	.03	.07	-.23	.08	.59	.65	.71
21	-.04	.04	-.05	.04	.98	.94	.94	94	-.12	.08	.04	.05	.95	.91	.90
22	-.04	.12	-.17	.12	.88	.87	.87	95	.06	.04	-.01	.03	.94	.90	.90
23	-.10	.03	.05	.05	.96	.91	.90	96	.34	.09	-.39	.07	.00	.00	.00
24	-.24	.08	.14	.11	.68	.42	.37	97	.01	.07	.04	.05	.96	.91	.91
25	-.60	.08	-.49	.10	.00	.00	.00	98	.26	.23	.34	.12	.34	.00	.00
26	-.05	.06	-.12	.04	.94	.92	.92	99	-.32	.07	.06	.09	.34	.26	.25
27	-.34	.11	.12	.08	.30	.09	.08	100	.02	.07	.05	.04	.95	.90	.90
28	.06	.09	.02	.07	.93	.88	.89	101	.01	.05	.00	.03	.97	.93	.93
29	-.15	.04	.02	.05	.93	.90	.89	102	.36	.07	-2.15	.07	.00	.00	.00 *
30	-.08	.08	.47	.09	.00	.00	.00	103	.54	.07	-1.04	.12	.00	.00	.00 *
31	-.26	.11	.04	.11	.81	.61	.56	104	.16	.09	.01	.09	.77	.64	.67
32	-.11	.12	.32	.11	.39	.04	.03	105	-.61	.18	-.10	.08	.01	.00	.00
33	-.10	.05	-.02	.06	.97	.93	.93	106	-1.96	1.16	-.88	.80	.46	.00	.00 *
34	-.02	.03	-.02	.03	.98	.94	.94	107	.81	.15	-.12	.15	.00	.00	.00
35	-.08	.03	-.02	.04	.98	.94	.93	108	.52	.06	.28	.10	.00	.00	.00
36	.02	.04	-.06	.03	.96	.92	.92	109	-.05	.19	.67	.13	.01	.00	.00
37	-.82	.07	-.24	.12	.00	.00	.00	110	-.03	.04	-.10	.04	.96	.93	.93
38	.10	.06	-.20	.10	.59	.60	.66	111	-.21	.07	-.14	.07	.70	.74	.73
39	.86	.04	1.16	.08	.00	.00	.00 *	112	-.21	.09	-.11	.08	.82	.78	.80
40	.05	.13	-.23	.10	.74	.61	.67	113	-.32	.11	-.08	.08	.51	.32	.33
41	-.04	.50	1.19	1.32	.46	.00	.00 *	114	-.15	.09	.13	.05	.82	.74	.72
42	.09	.06	-.33	.10	.06	.09	.12	115	-.05	.08	.01	.03	.97	.93	.93
43	.28	.04	.72	.07	.00	.00	.00	116	.39	.04	-.26	.06	.00	.00	.00
44	-.82	.12	1.67	.20	.00	.00	.00 *	117	-.49	.08	-.24	.09	.00	.00	.00
45	.40	.10	-.26	.14	.01	.00	.00	118	-.15	.05	.01	.07	.94	.90	.89
46	-.05	.12	.04	.17	.91	.92	.92	119	.03	.11	-.01	.11	.93	.92	.92
47	.32	.09	-1.07	.19	.00	.00	.00	120	.32	.18	-.37	.13	.10	.00	.00
48	.16	.07	-.16	.10	.54	.48	.55	121	-.18	.10	-.03	.05	.91	.88	.87
49	.04	.06	-.24	.06	.34	.59	.62	122	-.23	.11	.41	.09	.01	.00	.00
50	.00	.04	-.03	.04	.97	.93	.93	123	-1.05	.93	.58	.76	.61	.00	.00
51	-.11	.11	.08	.10	.92	.88	.87	124	-.14	.17	-.06	.10	.91	.91	.91
52	.44	.06	.39	.05	.00	.00	.00	125	1.73	.10	2.34	.08	.00	.00	.00 *
53	-.03	.04	-.01	.06	.98	.94	.94	126	.42	.08	.54	.10	.00	.00	.00
54	-.01	.13	.24	.06	.62	.30	.32	127	.87	.10	.31	.10	.00	.00	.00
55	-.17	.11	.06	.09	.90	.84	.82	128	.04	.13	-.29	.15	.65	.33	.40
56	-.26	.11	.21	.10	.47	.11	.11	129	-.14	.13	-.04	.07	.93	.91	.91
57	-.38	.18	-.05	.08	.55	.09	.10	130	.01	.16	.11	.12	.89	.83	.83
58	-.14	.12	-.11	.08	.91	.89	.89	131	-.47	.16	-.07	.09	.18	.00	.01
59	.04	.18	-.23	.07	.77	.64	.71	132	-.19	.15	-.56	.12	.01	.00	.00
60	-.02	.05	.13	.06	.87	.81	.81	133	.13	.10	-1.01	.08	.00	.00	.00 *
61	.00	.04	.09	.04	.93	.87	.87	134	-1.23	.24	-.35	.14	.00	.00	.00 *
62	-.04	.08	.00	.08	.96	.94	.93	135	-.08	.20	-.50	.15	.26	.00	.00
63	.01	.08	.09	.06	.93	.87	.86	136	.07	.05	-.04	.03	.92	.89	.89
64	-.07	.04	-.01	.06	.97	.94	.93	137	.16	.14	-.28	.12	.45	.10	.15
65	-.05	.03	.05	.04	.97	.92	.92	138	-.02	.15	-.09	.14	.90	.93	.93
66	.02	.03	.01	.03	.97	.92	.92	139	.94	.13	-.66	.13	.00	.00	.00
67	.59	.05	-.14	.06	.00	.00	.00	140	.33	.16	-.11	.14	.39	.01	.02
68	.63	.41	-.63	.99	.55	.00	.00	141	.04	.11	-.65	.13	.00	.00	.00
69	.28	.09	.16	.17	.35	.02	.02	142	-.35	.12	.09	.13	.59	.11	.09
70	-.04	.04	-.34	.10	.05	.16	.23	143	.13	.17	-.17	.17	.77	.59	.63
71	-.06	.05	.08	.06	.95	.89	.89	144	-.28	.14	-.91	.11	.00	.00	.00
72	-.19	.07	-.11	.08	.84	.83	.82	145	-.97	.09	-.02	.16	.00	.00	.00
73	.00	.13	-.31	.13	.59	.28	.35	146	-.73	.22	-.64	.17	.00	.00	.00

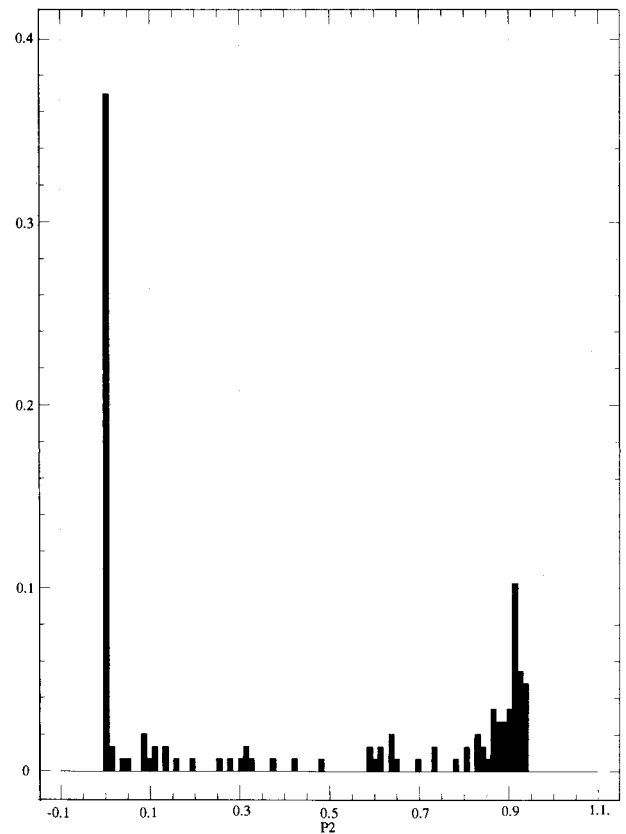
83, 89, 95, binarias espectroscópicas, son miembros de NCC2287 con probabilidad superior a 0.93, en concordancia con Ianna *et al.*; una afirmación similar puede hacerse de las posibles binarias, 58, 75, 97, 101, 110. Se aprecia así un cúmulo galáctico rico en estrellas binarias. Las tres estrellas Hg-Mn, 74, 86, 95, también son miembros probables en concordancia con Cox (1954), aunque a la segunda de ellas Ianna le asigna una bajísima probabilidad. Las estrellas gigantes 23, 60, 71 y 100 son miembros con alta probabilidad de pertenencia; no así la gigante 107 que tiene en este estudio una probabilidad nula de encontrarse en NGC2287, en concordancia con Ianna, aunque Cox la considera miembro del cúmulo. La estrella AOp, 17, no pertenece; Am, 26, se adscribe al cúmulo con alta probabilidad de pertenencia, en coincidencia con Ianna *et al.*

La adscripción al cúmulo de las gigantes K señaladas es de importancia fundamental, ya que son usadas para analizar la metalicidad en NGC2287 y en los estudios de evolución estelar.

Esta publicación es el resultado del proyecto de investigación "Astronomía Galáctica, Primera Etapa: Cúmulos Abiertos", y ha sido realizada con la colaboración financiera de COLCIENCIAS, entidad cuyo objetivo es impulsar el desarrollo científico y tecnológico de Colombia. Se ha tenido, además, la ayuda del Comité de Investigaciones y Desarrollo Científico, CINDEC, de la Universidad Nacional de Colombia.

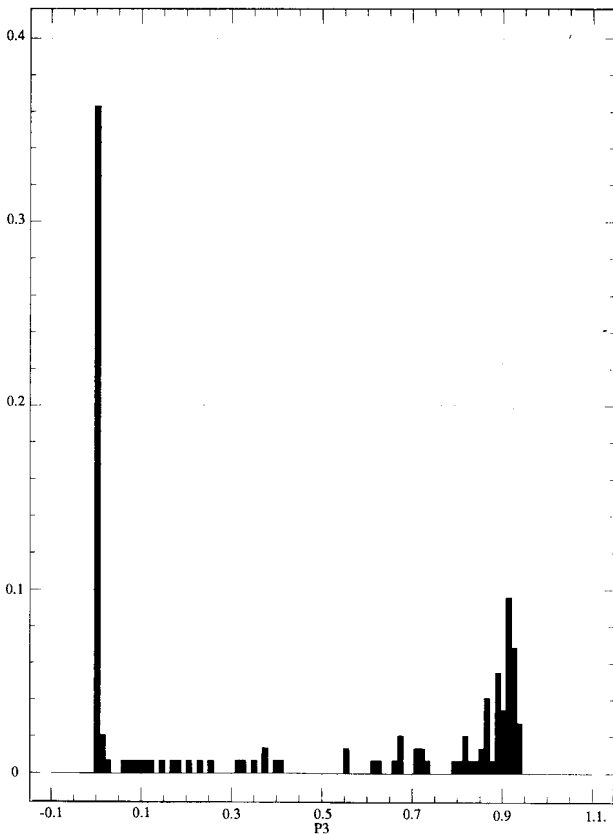


**Figura 2.** Función de densidad de la probabilidad de pertenencia al cúmulo galáctico NGC2287 cuando se tienen en cuenta los errores accidentales de los movimientos propios. Los datos provienen de la columna P1 de la tabla 1 y se obtienen siguiendo la metodología desarrollada en este artículo.



**Figura 3.** Función de densidad de la probabilidad de pertenencia al cúmulo galáctico NGC2287 cuando no se tienen en cuenta los errores accidentales de los movimientos propios. Los datos provienen de la columna P2 de la tabla 1, y se obtienen usando el modelo de Brieva y Uribe (1990).





**Figura 4.** Función de densidad de la probabilidad de pertenencia al cúmulo galáctico NGC2287 cuando no se tienen en cuenta los errores accidentales en los movimientos propios. Los datos provienen de la columna P3 de la tabla 1, y son los encontrados por Ianna *et al.* (1987), al usar el modelo de Vasilevskis (1958) y el método de cálculo de Sanders (1971).

## Bibliografía

- Brieva, E. & A. Uribe. 1985. Una aplicación del método de máxima verosimilitud en astronomía galáctica. *Revista Colombiana de Estadística* 12: 1-21.
- 1990. Sobre la determinación de la pertenencia de estrellas a cúmulos abiertos a partir de movimientos propios. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 17 (66):461-466.
- 1994. Pertenencia de estrellas en la región del cúmulo abierto NGC6530. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 19 (72):7-17.

- Cabrera, J. & E. J. Alfaro. 1985. Analysis of relative proper motion: an improved method to assign membership probabilities in open clusters. *Astron. Astrophys.* 150: 298-301.
- 1990. A non-parametric approach to the membership problem in open clusters. *Astron. Astrophys.* 235: 94-102.
- Cox, A. N. 1954. *Astrophys. J.*
- Cudworth, K. 1984. Comunicación personal.
- De Graeve, E. 1979. Astrometric criteria for selecting "Physical Members" of open clusters with low astrometric precision. Application To NGC559. *Vatican Observatory Publications* 1(16): 283-306.
- Hancock, H. 1917. *Theory of maxima and minima*, Dover, New York.
- Ianna, P. A., Adler, D. S. & E. F. Faudree. 1987. Membership in the open cluster NGC2287. *Astron. J.* 92: 347-358.
- Lattanzi, M. G., Massone, G. & U. Munari. 1991. Memberships and CM diagrams of young open clusters, I. NGC225. *Astron. J.* 102: 177-199.
- Missana, M. & N. Missana. 1990. A new method for deriving stellar membership with an application to the open cluster NGC 1664. *Astron. J.* 100:1850-1858.
- 1994. Amendment of our method for deriving stellar membership in open clusters. Comunicación Personal.
- Sanders, W. L. 1971. An improved method for computing membership probabilities in open clusters. *Astron. Astrophys.* 14: 226-232.
- Slovak, M. H. 1977. Maximum-Likelihood method for determination of membership in open clusters. *Astron. J.* 82: 818-823.
- Uribe, A. & E. Brieva. 1994. The problem of stellar membership in open clusters. *Astrophysics and Space Science* 214: 171-183.
- Vasilevskis, S., Klemola, A. & G. Preston. 1958. Relative proper motions of stars in the region of the open cluster NGC6633. *Astron. J.* 63: 387-395.
- Zhao, J.L., Tian, K., Su, Z. & M. YIN. 1982. Discussion on the maximum likelihood method for determination of membership in open clusters. *Chin. Astron. Astrophys.* 6: 293-298.
- Zhao, J. L. & Y.P. HE. 1990. An improved method for membership determination of stellar clusters with proper motions with different accuracies. *Astron. Astrophys.* 237: 54-60.

# INTEGRACION ANALITICA DE LAS ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE UN SATELITE PERTURBADO POR LOS ARMONICOS SECTORIALES $J_{22}$ Y $K_{22}$ EN TERMINOS DE LA TRANSFORMACION KS

por

José Gregorio Portilla B.\*

## Resumen

**Portilla, J.G.:** Integración analítica de las ecuaciones de movimiento de un satélite perturbado por los armónicos  $J_{22}$  y  $K_{22}$  en términos de la transformación KS. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 15-23, 1996. ISSN 0370-3908.

A partir de las ecuaciones de perturbación en términos de la transformación KS se desarrolla la integración analítica de las ecuaciones que describen el movimiento de un satélite perturbado por los armónicos sectoriales  $J_{22}$  y  $K_{22}$  del potencial gravitacional terrestre. El desarrollo en series es llevado hasta la cuarta potencia en las excentricidades. La simetría existente permite integrar solamente dos de las nueve ecuaciones. Se presenta una comparación entre la teoría y la integración numérica directa de las ecuaciones de movimiento.

**Palabras claves:** Mecánica celeste - satélites artificiales - potencial.

## Abstract

Starting from the equations of perturbation of the KS-transformation, analytical integration of equations describing the motion of a perturbed satellite by sectorial harmonic  $J_{22}$  and  $K_{22}$  is developed. The series expansion is carried out to fourth power of the eccentricity. The symmetry between the differential equations allows integrate only two of the nine equations. A comparison between the theory and the direct numerical integration of the equations of movement is presented.

**Keys words:** Celestial mechanics - artificial satellites - potential.

\* Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 2584, Santafé de Bogotá, Colombia. E-Mail: gportill @ciencias.campus.unal.edu.co

## Introducción

La determinación de la posición de un satélite artificial alrededor de la tierra no es tarea sencilla. Y más si se pretende conocerla con un alto grado de exactitud. Por un lado son varias las fuerzas que afectan el movimiento: la atracción gravitacional generada por la tierra, el sol, la luna y los planetas, el rozamiento con la atmósfera, la presión de radiación, el campo magnético terrestre, la resistencia del polvo interplanetario, el efecto Poynting-Robertson, el efecto Yarkovsky, el efecto Schach, etc. Por otro lado, al resolver las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento, se encuentra el inconveniente de que éstas no se pueden integrar de forma completamente general. Esto deja sólo dos opciones: la primera es recurrir a métodos aproximativos de integración de ecuaciones diferenciales, usualmente por expansión en series de potencias; la segunda consiste en la integración numérica directa de las ecuaciones. Las integraciones analíticas tienen el inconveniente de generar expresiones algebraicas muy extensas y en algunos casos los métodos que permiten la integración son de dudosa validez matemática. La integración numérica consume bastante tiempo de CPU y los problemas de redondeo y de degradación en cifras significativas son serios. Ambos métodos comparten la desventaja de que son útiles sólo para períodos cortos de tiempo.

Desde finales de los años cincuenta se han venido desarrollando decenas de teorías analíticas, procurando la mayoría atacar el problema del movimiento sujeto al complicado campo gravitacional generado por la no esfericidad de la tierra. Se destacan las ahora clásicas teorías de **Brouwer** (1959) y **Kozai** (1959) que incluyeron los armónicos  $J_2$ ,  $J_3$  y  $J_4$ . Con el rápido advenimiento de satélites colocados en diversas órbitas hubo la necesidad de extender los desarrollos para incluir armónicos superiores. Hoy en día se conocen, con bastante precisión (gracias al estudio minucioso del movimiento de satélites geodésicos), los armónicos terrestres hasta  $J_{3636}$ . De importancia en la descripción del movimiento de satélites geostacionarios son los armónicos sectoriales  $J_{22}$  y  $K_{22}$  que dan cuenta de la variación en longitud del potencial. Estos términos representan la denominada triaxialidad del ecuador y tienen gran importancia en la estabilidad y en la conservación del equilibrio en la posición estacionaria de un satélite de 24 horas, véase por ejemplo **Blitzer et al.** (1963) o **Morando** (1963).

Con el desarrollo de la transformación KS y la regularización de las ecuaciones de movimiento (**Stiefel y Scheifele**, 1971), se dispone de un formalismo novedoso que permite facilitar el estudio de cierto tipo de

movimientos, particularmente encuentros cercanos y colisiones. Si bien es cierto que los denominados elementos en la transformación KS son diez (9 de los cuales son constantes y uno función lineal del tiempo en el movimiento kepleriano), tienen la enorme ventaja de que las ecuaciones diferenciales de los mismos en el movimiento perturbado son de primer orden y en algunos casos son relativamente sencillas de resolver. **Sharma** (1989) estudió el movimiento de un satélite perturbado por el armónico zonal  $J_2$  y demostró que gracias a la simetría de las ecuaciones bastaba integrar no diez ecuaciones sino tres. Posteriormente el mismo autor (**Sharma**, 1993) realizó los desarrollos que incluyeron los armónicos zonales  $J_3$  y  $J_4$ . **Portilla** (1994) extendió la teoría para incluir los armónicos zonales  $J_5$  y  $J_6$ . En la presente comunicación consideraremos las perturbaciones originadas por un potencial dependiente de la longitud y particularmente se estudiarán las originadas por los armónicos sectoriales  $J_{22}$  y  $K_{22}$ .

## Las Ecuaciones Diferenciales

Las ecuaciones diferenciales de primer orden que describen la variación de los elementos de la transformación KS en términos de la anomalía excéntrica  $E$  de un objeto sometido solamente a fuerzas que se derivan de un potencial perturbador  $V_p$  son, (**Stiefel y Scheifele**, 1971):

$$\frac{d\omega}{dE} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d\tau}{dE} = \frac{1}{8\omega^3} \left[ K^2 - 2rV_p - \frac{r}{2} \left( \vec{u}, \frac{\partial V_p}{\partial \vec{u}} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{\alpha}}{dE} = \frac{1}{2\omega^2} \left[ \frac{V_p}{2} \vec{u} + \frac{r}{4} \frac{\partial V_p}{\partial \vec{u}} \right] \operatorname{sen} \frac{E}{2}, \quad (3)$$

$$\frac{d\vec{\beta}}{dE} = -\frac{1}{2\omega^2} \left[ \frac{V_p}{2} \vec{u} + \frac{r}{4} \frac{\partial V_p}{\partial \vec{u}} \right] \cos \frac{E}{2}, \quad (4)$$

en donde  $\omega$  es la frecuencia angular,  $\tau$  el tiempo ficticio,  $\vec{\alpha}$  y  $\vec{\beta}$  representan cada uno un cuatrvector de elementos,  $K^2 = GM$  ( $G$  siendo la constante de Cavendish y  $M$  la masa del cuerpo central), y  $r$  es el radio vector que viene dado por

$$r = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}; \quad (5)$$

la relación entre el vector  $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)$  y el vector  $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3, u_4)$  está dada por la denominada matriz KS

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 - u_2 - u_3 & u_4 \\ u_2 & u_1 - u_4 - u_3 \\ u_3 & u_4 & u_1 & u_2 \\ u_4 - u_3 & u_2 & -u_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Es claro que  $x_4 = 0$ .

Las componentes de  $\vec{u}$  son funciones armonicas de la anomalía excéntrica (la variable independiente en este formalismo) mediante

$$\vec{u} = \vec{\alpha} \cos \frac{E}{2} + \vec{\beta} \text{sen} \frac{E}{2}. \quad (7)$$

La relación entre el tiempo ficticio  $\tau$  y el tiempo físico  $t$  viene dada por:

$$\tau = t + \frac{1}{\omega} (\vec{u}, \vec{u}^*), \quad (8)$$

donde

$$\vec{u}^* = \frac{d\vec{u}}{dE} = -\frac{1}{2} \vec{\alpha} \text{sen} \frac{E}{2} + \frac{1}{2} \vec{\beta} \cos \frac{E}{2}, \quad (9)$$

$$\omega = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{K^2}{r} - \frac{1}{2} |\dot{\vec{x}}|^2 - V_p \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

### El Potencial Perturbador

El potencial gravitacional de un cuerpo planetario se representa usualmente por una expresión de la forma (Cook, 1963):

$$V = -\frac{K^2}{r} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\cos \phi) T_{nm}(\lambda) \right]$$

donde  $R$  es el radio ecuatorial del cuerpo central,  $P_{nm}(\cos \phi)$  los polinomios asociados de Legendre,  $T_{nm}(\lambda) = C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \text{sen} m\lambda$ , con  $C_{nm}$  y  $S_{nm}$  constantes adimensionales propias para cada cuerpo llamados coeficientes armónicos y  $\lambda$  y  $\phi$  la longitud y el complemento de la latitud respectivamente.

Cuando el centro de masas del cuerpo planetario se toma como el origen de coordenadas se obtiene  $C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0$ . Considerando la expansión hasta  $n = 2$  y adoptando la notación comúnmente usada en dinámica de satélites ( $J_n = -C_{n0}$ ,  $J_{nm} = -C_{nm}$ ,  $K_{nm} = -S_{nm}$ ) llegamos a

$$V = -\frac{K^2}{r} \left[ 1 - J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 P_{20}(\cos \phi) \right] + \left[ \left( \frac{RK}{r} \right)^2 \left( \frac{1}{r} \right) P_{20}(\cos \phi) (J_{22} \cos 2\lambda + K_{22} \text{sen} 2\lambda) \right] \quad (11)$$

Los armónicos del tipo  $J_n$  son llamados zonales, los del tipo  $J_{nn}$  ( $n \neq 0$ ) sectoriales y los del tipo  $J_{nm}$  ( $m \neq n \neq 0$ ) teselares.

La ecuación (11) puede escribirse también

$$V = V_o + V_p^z + V_p^s,$$

en la cual

$$V_o = -\frac{K^2}{r}, \quad (12)$$

$$V_p^z = \frac{J_2 K^2}{r} \left( \frac{R}{r} \right)^2 P_{20}(\cos \phi), \quad (13)$$

$$V_p^s = \frac{K^2}{r} \left( \frac{R}{r} \right)^2 3 \text{sen}^2 \phi (J_{22} \cos 2\lambda + K_{22} \text{sen} 2\lambda), \quad (14)$$

donde en la última ecuación se ha utilizado la relación  $P_{20}(\cos \phi) = 3 \text{sen}^2 \phi$ . El potencial  $V_o$  está implícitamente incluido en las ecuaciones KS por tratarse del potencial que da origen al movimiento kepleriano. El potencial perturbador  $V_p^z$  que genera la denominada teoría principal del satélite artificial fue estudiado por Sharma (1989). En nuestro estudio nos concentraremos en el potencial perturbador  $V_p^s$  con el fin de estudiar los efectos de los armónicos sectoriales  $J_{22}$  y  $K_{22}$ .

La relación entre las coordenadas esféricas y rectangulares ( $x_1, x_2, x_3$ ) permite escribir

$$\text{sen}^2 \phi = \frac{x_1^2 + x_2^2}{r^2},$$

$$\cos 2\lambda = \frac{x_1^2 - x_2^2}{x_1^2 + x_2^2},$$

$$\text{sen} 2\lambda = \frac{2x_1 x_2}{x_1^2 + x_2^2},$$

y así obtenemos finalmente

$$V_p = V_p^s = \frac{3K^2 R^2}{r^5} [J_{22}(x_1^2 - x_2^2) + K_{22} x_1 x_2]. \quad (15)$$

### La Integración Analítica

La integración de la ecuación (1) es inmediata:

$$\omega = cte,$$

que no es sino otra forma de representar la conservación de la energía total del sistema (ver ec. 10).

Por otro lado, es fácil ver que

$$\left(\vec{u}, \frac{\partial V_p}{\partial \vec{u}}\right) = -6V_p,$$

y con la ecuación (15) podemos escribir la ecuación (2) como

$$\frac{d\tau}{dE} = \frac{K^2}{8\omega^3} \left\{ 1 + \frac{3R^2}{r^4} [J_{22}(x_1^2 - x_2^2) + 2K_{22}x_1x_2] \right\}. \quad (16)$$

Ahora bien, conocemos en un instante dado los vectores posición y velocidad del satélite, esto es, conocemos para una época de referencia los vectores  $\vec{x}$ ,  $\dot{\vec{x}}$ ,  $\vec{u}$ ,  $\vec{u}^*$  que también definen una órbita osculatriz con semieje mayor  $a$  y excentricidad  $e$  definidos por

$$a = \frac{rK^2}{2K^2 - 16\omega^2 |\vec{u}^*|^2},$$

$$e = \left[ \left(1 - \frac{r}{a}\right)^2 + \frac{16\omega^2}{K^2 a} (\vec{u} \cdot \vec{u}^*)^2 \right]^{1/2}.$$

Aplicando la ecuación  $r = a(1 - e \cos E)$  y expandiendo en términos de  $e$  hasta la cuarta potencia con ayuda del teorema del binomio obtenemos expresiones para  $1/r^n$  ( $n = 4, 5$ ) en función de  $E$ ,

$$\frac{1}{r^4} = 1 + 4e \cos E + 10e^2 \cos^2 E + 20e^3 \cos^3 E + 35e^4 \cos^4 E, \quad (17)$$

$$\frac{1}{r^5} = 1 + 5e \cos E + 15e^2 \cos^2 E + 35e^3 \cos^3 E + 70e^4 \cos^4 E. \quad (18)$$

Los valores de  $x_1$  y  $x_2$  en términos de  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  son dados por

$$\begin{aligned} x_1 &= \sigma_0 + \sigma_1 \cos E + \sigma_2 \operatorname{sen} E, \\ x_2 &= \pi_0 + \pi_1 \cos E + \pi_2 \operatorname{sen} E, \\ x_1^2 &= \gamma_0 + \gamma_1 \cos E + \gamma_2 \cos^2 E + \gamma_3 \operatorname{sen} E \\ &\quad + \gamma_4 \operatorname{sen} E \cos E, \\ x_2^2 &= \epsilon_0 + \epsilon_1 \cos E + \epsilon_2 \cos^2 E + \epsilon_3 \operatorname{sen} E \\ &\quad + \epsilon_4 \operatorname{sen} E \cos E, \\ x_1 x_2 &= \eta_0 + \eta_1 \cos E + \eta_2 \cos^2 E + \eta_3 \operatorname{sen} E \\ &\quad + \eta_4 \operatorname{sen} E, \end{aligned} \quad (19)$$

en donde

$$\sigma_0 = \frac{1}{2} [\alpha_1^2 + \beta_1^2 - (\alpha_2^2 + \beta_2^2) - (\alpha_3^2 + \beta_3^2) + \alpha_4^2 + \beta_4^2],$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2} [\alpha_1^2 - \beta_1^2 - (\alpha_2^2 - \beta_2^2) - (\alpha_3^2 - \beta_3^2) + \alpha_4^2 - \beta_4^2], \\ \sigma_2 &= \alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2 - \alpha_3 \beta_3 + \alpha_4 \beta_4, \\ \pi_0 &= \alpha_1 \alpha_2 - \alpha_3 \alpha_4 + \beta_1 \beta_2 - \beta_3 \beta_4, \\ \pi_1 &= \alpha_1 \alpha_2 - \alpha_3 \alpha_4 - \beta_1 \beta_2 + \beta_3 \beta_4, \\ \pi_2 &= \alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1 - \alpha_3 \beta_4 - \alpha_4 \beta_3, \\ \gamma_0 &= \sigma_0^2 + \sigma_2^2, \\ \gamma_1 &= 2\sigma_0 \sigma_1, \\ \gamma_2 &= \sigma_1^2 - \sigma_2^2, \\ \gamma_3 &= 2\sigma_0 \sigma_2, \\ \gamma_4 &= 2\sigma_1 \sigma_2, \\ \epsilon_0 &= \pi_0^2 + \pi_2^2, \\ \epsilon_1 &= 2\pi_0 \pi_1, \\ \epsilon_2 &= \pi_1^2 - \pi_2^2, \\ \epsilon_3 &= 2\pi_0 \sigma_2, \\ \epsilon_4 &= 2\pi_1 \pi_2, \\ \eta_0 &= \sigma_0 \pi_0 + \sigma_2 \pi_2, \\ \eta_1 &= \sigma_0 \pi_1 + \sigma_1 \pi_0, \\ \eta_2 &= \sigma_1 \pi_1 - \sigma_2 \pi_2, \\ \eta_3 &= \sigma_0 \pi_2 + \sigma_2 \pi_0, \\ \eta_4 &= \sigma_1 \pi_2 + \sigma_2 \pi_1. \end{aligned} \quad (20)$$

Sustituyendo las ecuaciones (17) y (19) en (16), integrando y ordenando tenemos

$$\tau = \frac{K^2}{8\omega^3} \left\{ E + \frac{3R^2}{a^4} [J_{22}\Psi(x) + 2K_{22}\Psi(\eta)] \right\}, \quad (21)$$

donde

$$\begin{aligned} \Psi(x) &= (v_0 + \frac{1}{2}v_2 + \frac{3}{8}v_4 + \frac{5}{16}v_6)E \\ &\quad + (v_1 + \frac{3}{4}v_3 + \frac{5}{8}v_5) \operatorname{sen} E \\ &\quad + \frac{1}{4}(v_2 + v_4 + \frac{5}{16}v_6) \operatorname{sen} 2E \\ &\quad + \frac{1}{12}(v_3 + \frac{5}{4}v_5) \operatorname{sen} 3E \\ &\quad + \frac{1}{32}(v_4 + \frac{3}{2}v_6) \operatorname{sen} 4E \\ &\quad + \frac{1}{80}v_5 \operatorname{sen} 5E + \frac{1}{192}v_6 \operatorname{sen} 6E \\ &\quad + (w_0 + \frac{1}{4}w_1 + \frac{1}{3}w_2 + \frac{5}{32}w_3 + \frac{1}{5}w_4 + \frac{11}{96}w_5) \\ &\quad - (w_0 + \frac{1}{4}w_2 + \frac{1}{8}w_4) \cos E \\ &\quad - \frac{1}{4}(w_1 + \frac{1}{2}w_3 + \frac{5}{16}w_5) \cos 2E \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{12}(w_2 + \frac{3}{4}w_4) \cos 3E - \frac{1}{32}(w_3 + w_5) \cos 4E \\
 & -\frac{1}{80}w_4 \cos 5E - \frac{1}{192}w_5 \cos 6E, \quad (22)
 \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned}
 v_0 &= \chi_0, \\
 v_1 &= \chi_1 + 4e\chi_0, \\
 v_2 &= \chi_2 + 4e\chi_1 + 10e^2\chi_0, \\
 v_3 &= 2e(2\chi_2 + 5e\chi_1 + 10e^2\chi_0), \\
 v_4 &= 5e^2(2\chi_2 + 4e\chi_1 + 7e^2\chi_0), \\
 v_5 &= 5e^3(4\chi_2 + 7e\chi_1), \\
 v_6 &= 35e^4\chi_2, \\
 w_0 &= \chi_3, \\
 w_1 &= \chi_4 + 4e\chi_3, \\
 w_2 &= 2e(2\chi_4 + 5e\chi_3), \\
 w_3 &= 10e^2(\chi_4 + 2e\chi_3), \\
 w_4 &= 5e^3(4\chi_4 + 7e\chi_3), \\
 w_5 &= 35e^4\chi_4, \quad (23)
 \end{aligned}$$

y además

$$\begin{aligned}
 \chi_0 &= \gamma_0 - \epsilon_0, \\
 \chi_1 &= \gamma_1 - \epsilon_1, \\
 \chi_2 &= \gamma_2 - \epsilon_2, \\
 \chi_3 &= \gamma_3 - \epsilon_3, \\
 \chi_4 &= \gamma_4 - \epsilon_4. \quad (24)
 \end{aligned}$$

El valor de  $\Psi(\eta)$  es completamente equivalente al de  $\Psi(\chi)$  salvo que, en las ecuaciones (23), los  $\chi_n$  ( $n = 0, 1, 2, 3, 4$ ) se reemplazan por los  $\eta_n$  ( $n = 0, 1, 2, 3, 4$ ) de las ecuaciones (20).

Por otro lado, las ecuaciones (3) y (4) pueden escribirse de la forma

$$\frac{d\alpha_i}{dE} = Q_i \text{sen}(E/2), \quad (25)$$

$$\frac{d\beta_i}{dE} = -Q_i \cos(E/2), \quad (26)$$

donde

$$\begin{aligned}
 Q_i &= \frac{3K^2 R^2}{4\omega^2} \left\{ -\frac{4[J_{22}(x_1^2 - x_2^2) + 2K_{22}x_1x_2]u_i}{r^5} + \right. \\
 & + (-1)^{i+1} \Delta_i \frac{[2J_{22}x_1 + 2K_{22}x_2]u_i}{r^4} + \\
 & \left. + \Delta_i \frac{[-2J_{22}x_2 + 2K_{22}x_1]u_k}{r^4} \right\}, \quad (27)
 \end{aligned}$$

con ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),

$$u_k = \begin{cases} i+1 & \text{si } i=1 \text{ o } 3 \\ i-1 & \text{si } i=2 \text{ o } 4 \end{cases} y$$

$$\Delta_i = \begin{cases} +1 & \text{si } i=1 \text{ o } 2 \\ -1 & \text{si } i=3 \text{ o } 4 \end{cases}$$

Puesto que en las ecuaciones (25) y (26) aparecen en cada uno de los términos expresiones de la forma  $u_i \text{sen}(E/2)$  y  $u_i \cos(E/2)$  y dado que éstos pueden ser escritos como

$$\begin{aligned}
 u_i \text{sen}(E/2) &= u_i \cos(E/2) = \\
 &= \frac{1}{2}[q_0^{(i)} + q_1^{(i)} \cos E + q_2^{(i)} \text{sen} E],
 \end{aligned}$$

con

$$q_0^{(i)} = \beta_i, \quad q_1^{(i)} = -\beta_i, \quad q_2^{(i)} = \alpha_i, \quad (28)$$

en el primer caso, y

$$q_0^{(i)} = \alpha_i, \quad q_1^{(i)} = \alpha_i, \quad q_2^{(i)} = \beta_i, \quad (29)$$

en el segundo caso, entonces es posible integrar analíticamente las ocho ecuaciones representadas por (25) y (26) con sólo resolver una de ellas. Al integrar las ecuaciones (25) y después de simplificar y arreglar obtenemos

$$\alpha_i = \frac{3K^2 R^2}{4\omega^2 a^4} [J_{22}\Xi(\chi) + K_{22}\Xi(\eta)], \quad (30)$$

con  $\tau = 0$  en  $t = 0$  y donde

$$\begin{aligned}
 \Xi(\chi) &= (r_0 + \frac{1}{2}r_2 + \frac{3}{8}r_4 + \frac{5}{16}r_6)E \\
 &+ (r_1 + \frac{3}{4}r_3 + \frac{5}{8}r_5 + \frac{35}{64}r_7) \text{sen} E \\
 &+ \frac{1}{4}(r_2 + r_4 + \frac{15}{16}r_6) \text{sen} 2E \\
 &+ \frac{1}{4}(\frac{1}{3}r_3 + \frac{5}{12}r_5 + \frac{7}{16}r_7) \text{sen} 3E \\
 &+ \frac{1}{32}(r_4 + \frac{3}{2}r_6) \text{sen} 4E + \frac{1}{80}(r_5 + \frac{7}{4}r_7) \text{sen} 5E \\
 &+ \frac{1}{192}r_6 \text{sen} 6E + \frac{1}{448}r_7 \text{sen} 7E \\
 &+ s_0 + \frac{1}{4}s_1 + \frac{1}{3}s_2 + \frac{5}{32}s_3 + \frac{1}{5}s_4 + \frac{11}{96}s_5 + \frac{1}{7}s_6 \\
 &- (s_0 + \frac{1}{4}s_2 + \frac{1}{8}s_4 + \frac{5}{64}s_6) \cos E \\
 &- \frac{1}{4}(s_1 + \frac{1}{2}s_3 + \frac{5}{16}s_5) \cos 2E
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{4}\left(\frac{1}{3}s_2 + \frac{1}{4}s_4 + \frac{3}{16}s_6\right) \cos 3E \\
& -\frac{1}{32}(s_3 + s_5) \cos 4E - \frac{1}{16}\left(\frac{1}{5}s_4 + \frac{1}{4}s_6\right) \cos 5E \\
& -\frac{1}{192}s_5 \cos 6E - \frac{1}{448}s_6 \cos 7E, \quad (31)
\end{aligned}$$

en la cual

$$\begin{aligned}
r_0 &= \rho_0 g_0^{(i)} + \rho_1 m_0^{(i)} + \rho_2 n_0^{(k)}, \\
r_1 &= \rho_0(g_1^{(i)} + 5eg_0^{(i)}) + \rho_1(m_1^{(i)} \\
& \quad + 4em_0^{(i)}) + \rho_2(n_1^{(k)} + 4en_0^{(k)}), \\
r_2 &= \rho_0(g_2^{(i)} + 5eg_1^{(i)} + 15e^2g_0^{(i)}) \\
& \quad + \rho_1(m_2^{(i)} + 4em_1^{(i)} + 10e^2m_0^{(i)}) \\
& \quad + \rho_2(n_2^{(k)} + 4en_1^{(k)} + 10e^2n_0^{(k)}), \\
r_3 &= \rho_0(g_3^{(i)} + 5eg_2^{(i)} + 15e^2g_1^{(i)} + 35e^3g_0^{(i)}) \\
& \quad + 2\rho_1e(2m_2^{(i)} + 5em_1^{(i)} + 10e^2m_0^{(i)}) \\
& \quad + 2\rho_2e(2n_2^{(k)} + 5en_1^{(k)} + 10e^2n_0^{(k)}), \\
r_4 &= 5\rho_0e(g_3^{(i)} + 3eg_2^{(i)} + 7e^2g_1^{(i)} + 14e^3g_0^{(i)}) \\
& \quad + 5\rho_1e^2(2m_2^{(i)} + 4em_1^{(i)} + 7e^2m_0^{(i)}) \\
& \quad + 5\rho_2e^2(2n_2^{(k)} + 4en_1^{(k)} + 7e^2n_0^{(k)}), \\
r_5 &= 5\rho_0e^2(3g_3^{(i)} + 7eg_2^{(i)} + 14e^2g_0^{(i)}) \\
& \quad + 5\rho_1e^3(4m_2^{(i)} + 7em_1^{(i)}) \\
& \quad + 5\rho_2e^3(4n_2^{(k)} + 7en_1^{(k)}), \\
r_6 &= 35\rho_0e^3(g_3^{(i)} + 2eg_2^{(i)}) + 35\rho_1e^4m_2^{(i)} \\
& \quad + 35\rho_2e^4n_2^{(k)}, \\
r_7 &= 70\rho_0e^4g_3^{(i)}, \\
s_0 &= \rho_0g_4^{(i)} + \rho_1m_3^{(i)} + \rho_2n_3^{(k)}, \\
s_1 &= \rho_0(g_5^{(i)} + 5eg_4^{(i)}) + \rho_1(m_4^{(i)} + 4em_3^{(i)}) \\
& \quad + \rho_2(n_4^{(k)} + 4en_3^{(k)}), \\
s_2 &= \rho_0(g_6^{(i)} + 5eg_5^{(i)} + 15e^2g_4^{(i)}) \\
& \quad + 2\rho_1e(2m_4^{(i)} + 5em_3^{(i)}) \\
& \quad + 2\rho_2e(2n_4^{(k)} + 5en_3^{(k)}), \\
s_3 &= 5\rho_0e(g_6^{(i)} + 3eg_5^{(i)} + 7e^2g_4^{(i)}) \\
& \quad + 10\rho_1e^2(m_4^{(i)} + 2em_3^{(i)}) + 10\rho_2e^2(n_4^{(k)} \\
& \quad + 2en_3^{(k)}), \\
s_4 &= 5\rho_0e^2(3g_6^{(i)} + 7eg_5^{(i)} + 14e^2g_4^{(i)}) \\
& \quad + 5\rho_1e^3(4m_4^{(i)} + 7em_3^{(i)}) \\
& \quad + 5\rho_2e^3(4n_4^{(k)} + 7en_3^{(k)}), \\
s_5 &= 35\rho_0e^3(g_6^{(i)} + 2eg_5^{(i)}) + 35\rho_1e^4m_4^{(i)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 35\rho_2e^4n_4^{(k)}, \\
s_6 &= 70\rho_0e^4g_6^{(i)}, \quad (32)
\end{aligned}$$

y al mismo tiempo

$$\begin{aligned}
g_0^{(i)} &= \chi_0q_0^{(i)} + \chi_3q_2^{(i)}, \\
g_1^{(i)} &= \chi_1q_0^{(i)} + \chi_0q_1^{(i)} + \chi_4q_2^{(i)}, \\
g_2^{(i)} &= \chi_2q_0^{(i)} + \chi_1q_1^{(i)} - \chi_3q_2^{(i)}, \\
g_3^{(i)} &= \chi_2q_1^{(i)} - \chi_4q_2^{(i)}, \\
g_4^{(i)} &= \chi_3q_0^{(i)} + \chi_0q_2^{(i)}, \\
g_5^{(i)} &= \chi_4q_0^{(i)} + \chi_3q_1^{(i)} + \chi_1q_2^{(i)}, \\
g_6^{(i)} &= \chi_4q_1^{(i)} + \chi_2q_2^{(i)}, \quad (33)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_0^{(i)} &= \sigma_0q_0^{(i)} + \sigma_2q_2^{(i)}, \\
m_1^{(i)} &= \sigma_0q_1^{(i)} + \sigma_1q_0^{(i)}, \\
m_2^{(i)} &= \sigma_1q_1^{(i)} - \sigma_2q_2^{(i)}, \\
m_3^{(i)} &= \sigma_0q_2^{(i)} + \sigma_2q_0^{(i)}, \\
m_4^{(i)} &= \sigma_1q_2^{(i)} + \sigma_2q_1^{(i)}, \quad (34)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
n_0^{(i)} &= \pi_0q_0^{(i)} + \pi_2q_2^{(i)}, \\
n_1^{(i)} &= \pi_0q_1^{(i)} + \pi_1q_0^{(i)}, \\
n_2^{(i)} &= \pi_1q_1^{(i)} - \pi_2q_2^{(i)}, \\
n_3^{(i)} &= \pi_0q_2^{(i)} + \pi_2q_0^{(i)}, \\
n_4^{(i)} &= \pi_1q_2^{(i)} + \pi_2q_1^{(i)}, \quad (35)
\end{aligned}$$

con

$$\rho_0 = -\frac{2}{a}, \quad \rho_1 = (-1)^{i+1}\Delta_i, \quad \rho_2 = -\Delta_i. \quad (36)$$

La ecuación para  $\Xi_{(\eta)}$  es equivalente a la ecuación (31) pero con los cambios siguientes: en las ecuaciones para  $r$  y  $s$ , ecuaciones (32), los valores de  $\rho_0$  y  $\rho_2$  son remplazados por:

$$\rho_0 = -\frac{4}{a}, \quad \rho_2 = \Delta_i, \quad (37)$$

los  $m_n^{(i)}$  ( $n = 0, 1, 2, 3, 4$ ) son reemplazados por los  $n_n^{(i)}$  ( $n = 0, 1, 2, 3, 4$ ) y viceversa y los valores de  $g_n^{(i)}$  ( $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) son ahora calculados reemplazando los valores de  $\chi_n$  ( $n = 0, 1, 2, 3, 4$ ) por los  $\eta_n$  ( $n = 0, 1, 2, 3, 4$ ).

Para obtener  $\beta_i$  basta con utilizar los valores de  $q_n^{(i)}$ ,  $n=0,1,2$  que aparecen en la ecuación (29) y colocar un signo negativo al lado derecho de la ecuación (30).

Al adoptar  $E = 0$  como condición inicial obtenemos:

$$\tau = \frac{1}{\omega} (\vec{u}, \vec{u}^*),$$

$$\vec{\alpha} = \vec{u}, \quad \vec{\beta} = \vec{u}^*.$$

Con esto, las ecuaciones (21) y (30) permiten el cálculo de  $\tau$ ,  $\vec{\alpha}_{iE_1}$  y  $\vec{\beta}_{iE_1}$  para el instante correspondiente a  $E = E_1$  y se tendrá

$$\alpha_i = \alpha_{i0} + \alpha_{iE_1},$$

$$\beta_i = \beta_{i0} + \beta_{iE_1}.$$

Habiendo calculado  $\tau$ ,  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  se procede a determinar el tiempo físico  $t$  y los vectores  $\vec{x}$  y  $\vec{z}$ .

## Resultados Numéricos

Con el fin de establecer hasta que punto la teoría analítica aquí desarrollada describe adecuadamente el movimiento de un satélite perturbado únicamente por los armónicos sectoriales  $J_{22}$  y  $K_{22}$  se realizó una comparación con valores que se obtienen directamente de integrar numéricamente las ecuaciones (1) a (4). Se estudiaron dos casos A y B con diferentes semiejes mayores (órbitas de 24 horas y 12 horas respectivamente) y excentricidades también distintas pero con los restantes parámetros orbitales iguales. Las condiciones iniciales (vectores de posición y velocidad junto con los parámetros orbitales) utilizados en este estudio se transcriben en la tabla 1. A través de todo el estudio los valores adoptados para  $K^2$  y  $R$  fueron  $398600.5 \text{ km}^3\text{s}^{-2}$  y  $6378.14 \text{ km}$  respectivamente. Igualmente, los valores de  $J_{22}$  y  $K_{22}$  fueron calculados a partir de los respectivos coeficientes completamente normalizados (Seidelmann, 1992). Los valores calculados son:  $J_{22} = -1.574321255 \times 10^{-6}$ ,  $K_{22} = 9.035926411 \times 10^{-7}$ .

Las tablas 2 y 3 contienen los resultados tanto analíticos como numéricos para los casos A y B respectivamente. Las tablas contienen el tiempo del paso por el perigeo en segundos, las componentes de los vectores posición en kilómetros, las de la velocidad en kilómetros por segundo, y los elementos orbitales osculadores en función de varios valores arbitrarios de  $E$  (100, 500, 5100, 36270). La integración numérica de las ecuaciones (1), (16), (25) y (26), en total 10 ecuaciones de primer orden, fue llevada a cabo utilizando el integrador numérico

Radau (Everhart, 1985). El paso de integración en la variable independiente  $E$  fue de 0.01 radianes (0.57 grados). Así mismo, los valores de esta integración numérica fueron comparados a modo de control con los de una integración numérica alterna de las tres ecuaciones diferenciales de segundo orden ( $\ddot{\vec{x}} = -\nabla V_p^s$ ) en las cuales la variable independiente es el tiempo físico. Los valores que se obtienen en ambas integraciones numéricas coinciden hasta en la doceava cifra decimal para todos los valores de la variable independiente. Por tal razón, los resultados de esta última integración no se hallan consignados en las tablas.

Como es de esperarse, para valores pequeños de  $E$  la teoría analítica se acomoda perfectamente a los resultados de la integración numérica. Los resultados para el caso A (satélite de 24 horas) indican que la integración analítica arroja valores muy buenos aún para grandes valores de  $E$ . Por ejemplo, para  $E=36270$ , equivalente en este caso a 100.481176 días transcurridos desde el tiempo inicial, los valores de las componentes en  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$  divergen en tan sólo la última cifra decimal con respecto a los valores obtenidos en la integración numérica. Aún para valores moderadamente grandes en excentricidad, como en el caso B, la teoría analítica se comporta bien, pues al cabo de 50.518178 días transcurridos desde el tiempo inicial ( $E=36270$ ), las componentes del vector posición se diferencian en la tercera cifra decimal con respecto a los valores que se obtienen en la integración numérica, lo que representa una incertidumbre de apenas unos pocos metros en posición. De igual forma los valores que se obtienen de los elementos orbitales calculados con la teoría analítica, para grandes valores de  $E$ , se diferencian en muy poco con los arrojados por la inte-

Tabla 1. Condiciones Iniciales

Cond. Ini.	Caso A	Caso B
$x_1$ (Km)	0.0	0.0
$x_2$ (Km)	-41531.1864898	-24257.9241064
$x_3$ (Km)	-362.4371737	-211.6956966
$\dot{x}_1$ (Km/s)	3.12109162	4.2320140
$\dot{x}_2$ (Km/s)	0.0	0.0
$\dot{x}_3$ (Km/s)	0.0	0.0
$a$ (Km)	42165.2466298	26658.0745154
$e$	0.015	0.09
$i$	0.5	0.5
$\omega$	270.0	270.0
$\Omega$	0.0	0.0
$M$	0.0	0.0



Tabla 2. Comparación entre la teoría analítica y la integración numérica. CASO A

Parámetro	Anal., $E=100$	Num., $E=100$	Anal., $E=500$	Num., $E=500$	Anal., $E=51000$	Num., $E=51000$	Anal., $E=36270$	Num., $E=36270$
$t(\text{seg})$	23732.8072861	23732.8072861	119544.7464457	119544.7464456	1220527.0112318	1220527.0112311	8681573.6159061	8681573.6159012
$x_1$	41520.0005359	41520.0005359	27100.2510018	27100.2510018	36512.0774301	36512.0774301	-42160.5182948	-42160.5182943
$x_2$	7954.1111457	7954.1111457	32931.6995056	32931.6995055	-20449.3604465	-20449.3604466	632.4614621	632.4614626
$x_3$	69.4144369	69.4144369	287.3905342	287.3905342	-178.4628981	-178.4628981	5.5447802	5.5447802
$\dot{x}_1$	-0.5324558	-0.5324558	-2.3282774	-2.3282774	1.5487533	1.5487533	0.0000004	0.0000004
$\dot{x}_2$	3.0199289	3.0199289	1.9538015	1.9538015	2.6827192	2.6827192	-3.0745036	-3.0745036
$\dot{x}_3$	0.0263545	0.0263545	0.0170506	0.0170506	0.0234117	0.0234117	-0.0268318	-0.0268318
$a$ (km)	42165.2654369	42165.2654369	42165.2522990	42165.2522990	42165.2683831	42165.2683831	42165.2682186	42165.2682185
$e$	0.0150002	0.0150002	0.0150003	0.0150003	0.0150004	0.0150004	0.0150003	0.0150003
$i$	0.5000000	0.5000000	0.5000002	0.5000002	0.5000027	0.5000027	0.5000196	0.5000196
$\Omega$	0.0000064	0.0000064	0.0000497	0.0000497	0.0005515	0.0005515	0.0039173	0.0039173
$\omega$	270.0006010	270.0006008	269.9996131	269.9996131	270.0001480	270.0001480	269.9955501	269.9955500
$M$	99.1530111	99.1530111	139.4479034	139.4479034	59.2549932	59.2549932	270.8599934	270.8599935

Tabla 3. Comparación entre la teoría analítica y la integración numérica. CASO B

Parámetro	Anal., $E=100$	Num., $E=100$	Anal., $E=500$	Num., $E=500$	Anal., $E=51000$	Num., $E=51000$	Anal., $E=36270$	Num., $E=36270$
$t(\text{seg})$	11421.3529883	11421.3529879	59763.1511753	59763.1511799	613114.8750115	613114.8749699	4364770.6511448	4364770.6511103
$x_1$	26146.5532099	26146.5532149	17065.9427893	17065.9428149	22992.8964282	22992.8967564	-26549.9178005	-26549.9155281
$x_2$	7028.1145968	7028.1145969	22819.6651951	22819.6651997	-10929.3845323	-10929.3844801	2399.1481082	2399.1475382
$x_3$	61.3333599	61.3333598	199.1441347	199.1441348	-95.3855185	-95.3855180	20.9793891	20.9793839
$\dot{x}_1$	-0.6584531	-0.6584531	-2.7598609	-2.7598609	2.0162999	2.0162999	0.0000011	0.0000011
$\dot{x}_2$	3.7493370	3.7493370	2.3251444	2.3251444	3.5064316	3.5064316	-3.8666763	-3.8666766
$\dot{x}_3$	0.0327199	0.0327199	0.0202913	0.0202913	0.0306001	0.0306002	-0.0337473	-0.0337473
$a$ (km)	26658.1036323	26658.1036372	26658.0858557	26658.0858598	26658.1135133	26658.1135044	26658.1114505	26658.1113547
$e$	0.0900004	0.0900004	0.0900008	0.0900008	0.0900009	0.0900009	0.0900007	0.0900007
$i$	0.5000000	0.5000000	0.5000007	0.5000007	0.5000068	0.5000068	0.5000497	0.5000497
$\Omega$	0.0000178	0.0000178	0.0001282	0.0001282	0.0014028	0.0014027	0.0099542	0.0099540
$\omega$	270.0002119	270.0002119	269.9997706	269.9997700	269.9989583	269.9989507	269.9898760	269.9898240
$M$	94.9214896	94.9214896	136.6854910	136.6854917	55.5338460	55.5338534	275.1568472	275.1569000

gración numérica. Se puede así estudiar globalmente la evolución de la forma y orientación de la órbita conforme avanza el tiempo. Se observa la ausencia de cambio secular en el semieje mayor y la excentricidad, lo que sí se observa en la inclinación, en la longitud del nodo ascendente y en el argumento de latitud del perigeo. Esto era de esperarse, pues las ecuaciones de Lagrange promediadas sobre la anomalía media (eliminando los términos de período corto) indican precisamente ese comportamiento (Véase Meyer *et al*, 1994, p. 27).

Los valores de  $J_{22}$  y  $K_{22}$ , en el caso de la tierra, son muy pequeños. Esto permite que la teoría analítica aquí expuesta sea de utilidad aún para períodos extendidos de tiempo, i.e., hasta para varias decenas de revoluciones. Sharma (1989) estudió el caso del armónico zonal  $J_2$  y encontró que para el caso terrestre ( $J_2 \sim 10^{-3}$ ) la teoría describe adecuadamente el movimiento de un satélite sólo hasta la primera revolución,  $E < 360$ ; para valores superiores de  $E$  la teoría se degrada rápidamente. De ahí que Sharma haya llamado a su teoría una predicción

de corto término. Esto significa que sí se desea combinar todos los armónicos que afectan de forma significativa el movimiento de un satélite alrededor de la tierra ( $J_2, J_3, J_4, J_5, J_{22}$ ), para predecir lo mejor posible su movimiento, las teorías analíticas serán de utilidad sólo en la primera revolución, pues el armónico  $J_2$ , mil veces más grande que cada uno de los restantes, determina el movimiento general del satélite.

### Conclusión

La integración analítica de las ecuaciones de los elementos KS, cuando se considera la perturbación por los armónicos sectoriales  $J_{22}$  y  $K_{22}$  expandida hasta la cuarta potencia en las excentricidades, arroja expresiones que permiten describir con exactitud la evolución de un satélite terrestre aún para muchas revoluciones incluso si éste se mueve en órbitas moderadamente excéntricas. En el caso de aplicarlo al movimiento real de un satélite en órbita terrestre dicha exactitud para períodos exten-

didados de tiempo no sirve de mucho, ya que el armónico zonal, 1000 veces mayor que los sectoriales, representa un término de perturbación lo suficientemente grande como para que las teorías analíticas ya pierdan su exactitud al cabo de una revolución.

La teoría aquí expuesta puede ser gran utilidad en la descripción detallada del movimiento de un satélite en órbita lunar, incluso para varias revoluciones, ya que en este cuerpo (Meyer *et al.*, 1994)  $J_2 \sim J_{22} * 10^1 \sim J_3 * 10^1 \sim J_5 * 10^1 \sim 10^{-4}$ . En este caso el valor moderado de  $J_2$  con respecto a los armónicos siguientes permitiría elaborar una teoría aplicable para varias revoluciones sin preocuparse por la irrelevancia a largo plazo de los términos que provienen de los armónicos más pequeños.

### Agradecimientos

El autor desea expresar su agradecimiento al profesor Eduardo Brieva por sus comentarios y útiles sugerencias y a Indira Amanda Medina por la transcripción y revisión en las ecuaciones y las tablas. Este trabajo ha sido financiado por el CINDEC de la Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, a través del proyecto 803116.

### Bibliografía

- Blitzer, L., Kang, G. & B. McGuire. 1963. The Perturbed Motion of 24-Hour Satellites Due to Equatorial Ellipticity. *J. Geophys. Res.* **68**: 950-952.
- Brouwer, D. 1959. Solution of the Problem of Artificial Satellite Theory Without Drag. *Astron. J.* **64** (1274): 378-397.

- Cook, G.E. 1963. Perturbations of Satellite Orbits by Tesseral Harmonics in the Earth's Gravitational Potential. *Planet. Space Sci.* **11**: 797-815.
- Everhart, E. 1985. An Efficient Integrator That Uses Gauss-Radau Spacings. *Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution*, Carusi y Valsecchi (edi.): 185-202.
- Kosai, Y. 1959. The Motion of Close Earth Satellite. *Astron. J.* **64** (1274):367-377.
- Meyer, K., Buglia, J. & P. Desai. 1994. Lifetimes of Lunar Satellites Orbits. *NASA Technical Paper 3394*, Marzo 1994.
- Morando, M. B. 1963. Orbits de Résonance des Satellites de 24 H. *Bull. Astron.* **24**: 47-67.
- Portilla, J.G. 1994. Términos de Período Corto en el Movimiento de un Satélite Artificial Bajo la Acción de los Armónicos  $J_5$  y  $J_6$  del Potencial Terrestre, Integración Analítica Mediante el Uso de la Transformación KS. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **19** (72):317-335.
- Seidelmann, P. K. 1992. Explanatory Supplement to the *Astronomical Almanac*, University Science Books, Mill Valley, California.
- Sharma, R.K. 1989. Analytical Approach Using KS Elements to Short-Term Orbits Predictions Including  $J_2$ . *Cel. Mech. & Dyn. Astron.* **46** (4): 321-333.
1993. Analytical Short-Term Orbits Predictions with  $J_3$  and  $J_4$  in Terms of KS Elements. *Cel. Mech. & Dyn. Astron.* **56** (4): 505-521.
- Stiefel, E. & G. Scheifele. 1971. *Linear and Regular Celestial Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin.

# EL PROBLEMA DE LOS DOS CUERPOS Y EL PROBLEMA PRINCIPAL DEL SATELITE ARTIFICIAL EN ECUACIONES DIFERENCIALES DE PRIMER ORDEN

por

José Gregorio Portilla B.\*

## Resumen

**Portilla, J.G.:** El problema de los dos cuerpos y el problema principal del satélite artificial en ecuaciones diferenciales de primer orden. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 25-32, 1996. ISSN 0370-3908.

Se presenta una deducción de las ecuaciones diferenciales de primer orden que rigen el problema de los dos cuerpos en tres dimensiones tomando como variables la velocidad, el azimut, el ángulo de vuelo y las coordenadas esféricas. También se incluye la deducción de las ecuaciones cuando se presenta la fuerza de perturbación generada por el achatamiento del cuerpo central. La transformación directa entre éstas y las coordenadas rectangulares (y la inversa) es expuesta.

**Palabras claves:** Mecánica celeste - problema de los dos cuerpos - problema principal del satélite artificial - ecuaciones diferenciales - integración numérica.

## Abstract

A derivation of the differential equations which govern the three-dimensional two-body problem utilizing variables such as the velocity, azimuth, flight-path angle and spherical coordinates is presented. Besides, the deduction of the equations is presented when a perturbation force appears due to oblateness of the central body. Direct transformation between these and rectangular coordinates (and inverse) is commented.

**Key words:** Celestial mechanics - two-body problem - main artificial satellite problem - differential equations - numerical integration.

\* Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 2584, Santafé de Bogotá, Colombia. E-Mail: gportill @ciencias.campus.unal.edu.co

## Introducción

En el problema de los dos cuerpos se trata de describir matemáticamente el movimiento que presentan dos partículas materiales cuando están sometidas única y exclusivamente a la atracción recíproca debida a la fuerza de gravitación.

En la practica significa resolver las ecuaciones diferenciales que resultan de utilizar las leyes newtonianas de movimiento y aplicar las soluciones a todo tipo de situaciones y condiciones de frontera. Con ello se puede conocer el vector posición y velocidad de las partículas (con respecto a su centro de masas o con respecto a una de ellas) para todo tiempo. Es conocido que el problema de los dos cuerpos posee una solución analítica completamente general. El movimiento relativo de una de las partículas con respecto a la otra es o bien descrito por una cónica (elipse, parábola e hipérbola) o una línea recta. La posición en el tiempo es sencilla de calcular e implica resolver (a excepción del movimiento parabólico) ecuaciones trascendentes (McCuskey, 1963). Cuando se incluyen fuerzas de perturbación tales como asimetría esférica del cuerpo central, surgen complicaciones que hacen el problema difícil de resolver. Cuando sólo se considera la asimetría por achatamiento polar, i.e., se tiene en cuenta únicamente el armónico zonal  $J_2$ , el problema resultante es llamado problema principal del satélite artificial (PPSA) dado que el movimiento de estos objetos (cuando se mueven muy cerca del cuerpo central) es particularmente sensitivo a este tipo de perturbación. A pesar de los intentos de resolver por aproximaciones el PPSA realizados desde finales de los años cincuentas (que aún se utilizan extensivamente) y de los cuales merecen citarse los trabajos de Brouwer (1959), Kozai (1959) y Garfinkel (1959), hoy en día se sabe que el problema no es integrable (Irigoyen y Simó, 1993). La integración numérica directa de las ecuaciones de movimiento representa una manera poco elegante pero práctica de resolverlas. Hasta hace algunos años la integración numérica, aunque sencilla en sus principios, aplicada a casos reales representaba para el calculista una labor matemática monumental. Basta con señalar que en su estudio del movimiento del cometa Halley Cowell y Crommelin (1910), tardaron varios años en integrar numéricamente "a mano" las ecuaciones de perturbación. Con la llegada de la era del microprocesador el panorama ha cambiado drásticamente. Integraciones numéricas que hasta hace poco eran impensables se hacen ahora de forma rutinaria. Los modernos computadores permiten calcular la posición de los planetas hasta de centenares de millones de años en el pasado o en el futuro. La actual teoría

del movimiento de planetas y otros cuerpos celestes que es la base de muchos almanaques astronómicos es una integración numérica que incluye gran diversidad de perturbaciones (Standish, 1982). No es extraño entonces que en los últimos tiempos exista un enorme desarrollo de integradores numéricos pensados para cumplir con las más diversas necesidades (Kinoshita y Nakai, 1989). Pero las integraciones numéricas no están exentas de inconvenientes. Son procesos de cálculo que consumen mucho tiempo de CPU; en el proceso de integración se van perdiendo cifras significativas y pueden generar en ciertos casos resultados que no corresponden a la realidad. Esto es particularmente válido en el estudio de encuentros cercanos (o colisiones) entre cuerpos y en resonancias de movimiento medio.

En la presente comunicación presentamos la deducción de ecuaciones diferenciales de primer orden para el problema de los dos cuerpos y el PPSA en variables poco usuales. La integración numérica de ecuaciones diferenciales de primer orden tiene la ventaja, con respecto a la integración de las de segundo orden, que las soluciones tienen poca sensibilidad a problemas de estabilidad y excitación (Kinoshita y Yoshida, 1991).

## El Problema de los dos Cuerpos

Sean dos partículas de masas  $m_1$  y  $m_2$  sometidas única y recíprocamente a la fuerza de gravitación. Consideremos el movimiento de las mismas respecto a un sistema de coordenadas inerciales con un origen completamente arbitrario situado en  $O$  tal y como se muestra en la figura 1.

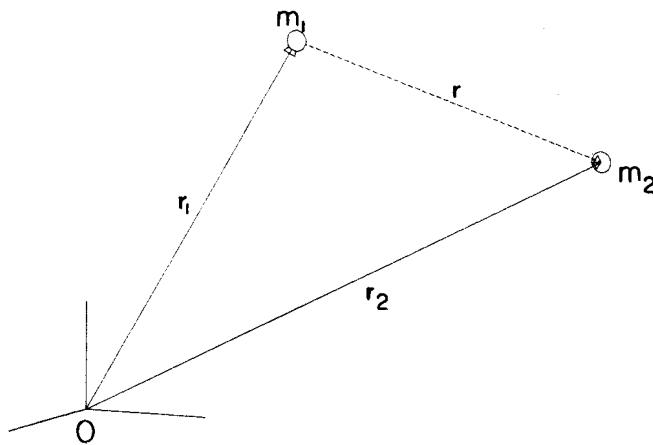


Figura 1

Los vectores  $\mathbf{r}_1$  y  $\mathbf{r}_2$  denotan la posición de las correspondientes partículas con respecto al origen en O. De la figura se desprende que

$$\mathbf{r}_1 + \mathbf{r} = \mathbf{r}_2, \quad (1)$$

donde  $\mathbf{r}$  representa el vector posición de la partícula de masa  $m_2$  con respecto a la partícula de masa  $m_1$ . Diferenciando la ecuación (1) dos veces con respecto al tiempo, multiplicando apropiadamente por las masas, y expresando, como es usual, la segunda derivada con respecto al tiempo como dos puntos sobre el caracter, obtenemos

$$\frac{m_2}{m_1} m_1 \ddot{\mathbf{r}}_1 + m_2 \ddot{\mathbf{r}} = m_2 \ddot{\mathbf{r}}_2,$$

pero  $m_1 \ddot{\mathbf{r}}_1$  es, de acuerdo con la segunda ley de Newton, la fuerza que se ejerce sobre la partícula de masa  $m_1$  debida a la partícula de masa  $m_2$  y que denotaremos por  $\mathbf{F}_{12}$ . Con el mismo razonamiento hacemos también  $m_2 \ddot{\mathbf{r}}_2 = \mathbf{F}_{21}$  y al tener en cuenta la ley de acción y reacción ( $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$ ) podemos escribir

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \ddot{\mathbf{r}}, \quad (2)$$

que nos describe la fuerza que se ejerce sobre la partícula de masa  $m_2$  debida a la masa  $m_1$  en términos del vector aceleración relativo  $\ddot{\mathbf{r}}$ . Por otro lado, la ley de atracción universal establece que

$$\mathbf{F}_{21} = -\frac{Gm_1 m_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}, \quad (3)$$

donde  $G$  es la constante de Cavendish y  $\hat{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}}{r}$ , un vector unitario en la dirección radial. Igualando las ecuaciones (2) y (3) encontramos la clásica ecuación diferencial de segundo orden del problema de los dos cuerpos

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{k^2(1 + \frac{m_2}{m_1})}{r^3} \mathbf{r}, \quad (4)$$

donde  $k$  es una constante de tal forma que  $k^2 = Gm_1$ . Al multiplicar vectorialmente ambos lados de la anterior ecuación por  $\mathbf{r} \times$ , y al sumar cero en la forma  $\dot{\mathbf{r}} \times \dot{\mathbf{r}}$  ( $\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}$ , el vector velocidad) tenemos

$$\dot{\mathbf{r}} \times \dot{\mathbf{r}} + \mathbf{r} \times \ddot{\mathbf{r}} = 0,$$

que al integrar con respecto al tiempo da

$$\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{h}, \quad (5)$$

donde  $\mathbf{h}$  es un vector constante llamado momentum angular e indica que el movimiento de  $m_2$  con respecto a  $m_1$  está contenido en un plano y por tanto el problema puede reducirse de tres a dos grados de libertad. Introduciendo

un sistema de coordenadas rectangulares centrado en  $m_1$  tal que se pueda escribir  $\mathbf{r}$  en la forma  $\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}$ , con lo que (4) representa tres ecuaciones diferenciales de segundo orden. Las magnitudes de los vectores posición y velocidad denotadas por  $r$  y  $v$  respectivamente vienen dadas por

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (6)$$

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}, \quad (7)$$

y así resulta

$$\mathbf{h} = (y\dot{z} - z\dot{y})\hat{\mathbf{i}} + (z\dot{x} - x\dot{z})\hat{\mathbf{j}} + (x\dot{y} - y\dot{x})\hat{\mathbf{k}}, \quad (8)$$

o también, de la definición del producto cruz

$$\mathbf{h} \underline{\underline{=}} r v \text{sen} \vartheta, \quad (9)$$

donde  $\vartheta$  es llamado ángulo de vuelo.

Al considerar (6) vemos que las ecuaciones (4) se hallan completamente acopladas y tal y como están escritas son imposibles de integrar analíticamente. La relajación del sistema, o sea, la transformación del problema a uno descrito por seis ecuaciones diferenciales de primer orden, en las mismas coordenadas cartesianas, es igualmente imposible. La solución clásica consiste, aprovechando la descripción en dos grados de libertad, en transformar las ecuaciones en coordenadas polares donde es posible separar las variables e integrar completamente las ecuaciones. Remitimos al lector a los textos clásicos de **Brouwer y Clemence**, 1961 o **Goldstein**, 1963.

## Las Ecuaciones Diferenciales

Nuestra intención aquí es derivar un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden cuya solución (analítica o numérica) permita encontrar, dadas unas condiciones iniciales dadas, las componentes del vector posición y velocidad para cualquier tiempo. Introducimos las coordenadas esféricas  $r$ ,  $\phi$  y  $\lambda$  donde la última se mide desde el eje  $y$  en el sentido de las agujas del reloj. La relación entre coordenadas cartesianas y esféricas es (ver figura 2):

$$\begin{aligned} x &= r \text{sen} \lambda \cos \phi, \\ y &= r \cos \lambda \cos \phi, \\ z &= r \text{sen} \phi. \end{aligned} \quad (10)$$

Derivando con respecto al tiempo obtenemos

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{r} \text{sen} \lambda \cos \phi - r \text{sen} \phi \text{sen} \lambda \dot{\phi} + r \cos \lambda \cos \phi \dot{\lambda}, \\ \dot{y} &= \dot{r} \cos \lambda \cos \phi - r \text{sen} \phi \cos \lambda \dot{\phi} - r \text{sen} \lambda \cos \phi \dot{\lambda}, \end{aligned}$$

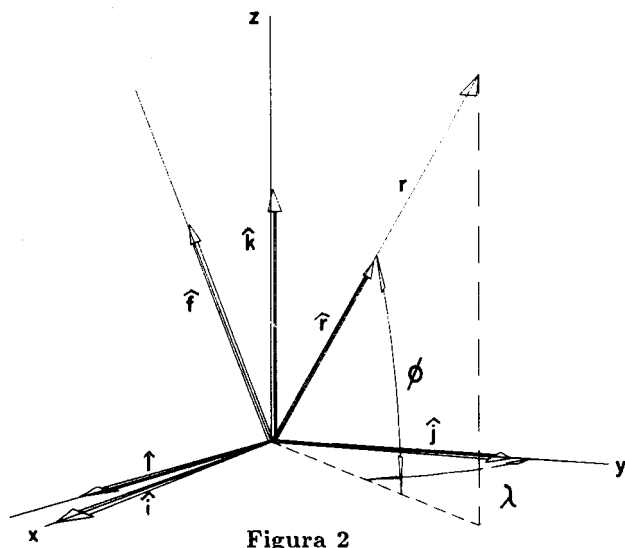


Figura 2

$$\dot{z} = \dot{r} \sin \phi + r \cos \phi \dot{\phi}. \quad (11)$$

Elevando al cuadrado cada una de las anteriores ecuaciones y sumando

$$\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} = \dot{r}^2 + r^2 \dot{\phi}^2 + r^2 \cos^2 \phi \dot{\lambda}^2. \quad (12)$$

Considérese ahora los vectores ortogonales unitarios  $\hat{\mathbf{r}}$ ,  $\hat{\mathbf{f}}$  y  $\hat{\mathbf{l}}$ , donde los dos últimos están en la dirección positiva de la variación de la latitud (hacia el norte) y la longitud (hacia el este) respectivamente tal y como se muestra en la figura 3. De la figura es claro que

$$\mathbf{v} = v \cos \vartheta \hat{\mathbf{r}} + v \sin \vartheta \cos A \hat{\mathbf{f}} + v \sin \vartheta \sin A \hat{\mathbf{l}}, \quad (13)$$

al comparar las ecuaciones (12) y (13) encontramos

$$\dot{r} = v \cos \vartheta, \quad (14)$$

$$r \dot{\phi} = v \sin \vartheta \cos A, \quad (15)$$

$$r \cos \phi \dot{\lambda} = v \sin \vartheta \sin A, \quad (16)$$

que constituyen tres de nuestras ecuaciones fundamentales. El ángulo  $A$  es llamado *azimut* e indica la dirección del vector velocidad con respecto a la dirección norte.

Otra forma de expresar el vector velocidad es en términos del vector unitario  $\hat{\mathbf{v}}$ , de tal forma que podamos escribir  $\mathbf{v} = v \hat{\mathbf{v}}$ , i.e.,  $\hat{\mathbf{v}}$  va en la dirección de la velocidad y hace parte de un conjunto de vectores unitarios ortogonales junto con  $\hat{\mathbf{h}}$  y  $\hat{\mathbf{a}}$  que llamaremos *esférico-azimutales* (Fig. 3). Nótese que  $\hat{\mathbf{h}}$  está en la misma dirección del vector momentum angular perpendicular al plano orbital y que  $\hat{\mathbf{a}}$  está en la dirección del *azimut*. La relación entre los vectores unitarios cartesianos  $\hat{\mathbf{i}}$ ,  $\hat{\mathbf{j}}$  y  $\hat{\mathbf{k}}$  y los unitarios esféricos  $\hat{\mathbf{r}}$ ,  $\hat{\mathbf{f}}$  y  $\hat{\mathbf{l}}$  es, como es fácil de ver en la figura 2,

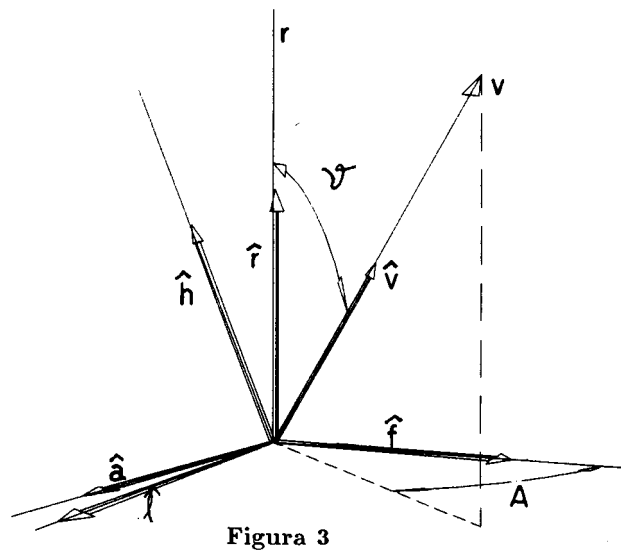


Figura 3

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{r}} &= \cos \phi \sin \lambda \hat{\mathbf{i}} + \cos \phi \cos \lambda \hat{\mathbf{j}} + \sin \phi \hat{\mathbf{k}}, \\ \hat{\mathbf{f}} &= -\sin \phi \sin \lambda \hat{\mathbf{i}} - \sin \phi \cos \lambda \hat{\mathbf{j}} + \cos \phi \hat{\mathbf{k}}, \\ \hat{\mathbf{l}} &= \cos \lambda \hat{\mathbf{i}} - \sin \lambda \hat{\mathbf{j}}. \end{aligned} \quad (17)$$

De forma equivalente podemos encontrar la relación entre los vectores esféricos  $\hat{\mathbf{r}}$ ,  $\hat{\mathbf{f}}$  y  $\hat{\mathbf{l}}$  con los unitarios esférico-azimutales  $\hat{\mathbf{v}}$ ,  $\hat{\mathbf{h}}$  y  $\hat{\mathbf{a}}$ . De la figura 3 se deduce

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{v}} &= \cos \vartheta \hat{\mathbf{r}} + \cos A \sin \vartheta \hat{\mathbf{f}} + \sin A \sin \vartheta \hat{\mathbf{l}}, \\ \hat{\mathbf{h}} &= \sin \vartheta \hat{\mathbf{r}} - \cos A \cos \vartheta \hat{\mathbf{f}} - \sin A \cos \vartheta \hat{\mathbf{l}}, \\ \hat{\mathbf{a}} &= -\sin A \hat{\mathbf{f}} + \cos A \hat{\mathbf{l}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Las relaciones inversas se obtienen fácilmente de las anteriores,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{i}} &= \cos \phi \sin \lambda \hat{\mathbf{r}} - \sin \phi \sin \lambda \hat{\mathbf{f}} + \cos \lambda \hat{\mathbf{l}}, \\ \hat{\mathbf{j}} &= \cos \phi \cos \lambda \hat{\mathbf{r}} - \sin \phi \cos \lambda \hat{\mathbf{f}} - \sin \lambda \hat{\mathbf{l}}, \\ \hat{\mathbf{k}} &= \sin \phi \hat{\mathbf{r}} + \cos \phi \hat{\mathbf{f}}, \end{aligned} \quad (19)$$

y también

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{f}} &= \sin \vartheta \cos A \hat{\mathbf{v}} - \cos A \cos \vartheta \hat{\mathbf{h}} - \sin A \hat{\mathbf{a}}, \\ \hat{\mathbf{l}} &= \sin \vartheta \sin A \hat{\mathbf{v}} - \sin A \cos \vartheta \hat{\mathbf{h}} + \cos A \hat{\mathbf{a}}, \\ \hat{\mathbf{r}} &= \cos \vartheta \hat{\mathbf{v}} + \sin \vartheta \hat{\mathbf{h}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Reemplazando las ecuaciones (17) en (18) podemos expresar  $\hat{\mathbf{v}}$  y  $\hat{\mathbf{h}}$  en términos de los vectores unitarios cartesianos de tal forma que

$$\hat{\mathbf{v}} = (-\cos A \sin \vartheta \sin \phi \sin \lambda + \sin A \sin \vartheta \cos \lambda$$

$$\begin{aligned}
& + \cos \vartheta \cos \phi \operatorname{sen} \lambda \hat{\mathbf{i}} + (-\cos A \operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \phi \cos \lambda \\
& - \operatorname{sen} A \operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \lambda + \cos \vartheta \cos \phi \cos \lambda) \hat{\mathbf{j}} \\
& + (\cos A \operatorname{sen} \vartheta \cos \phi + \cos \vartheta \operatorname{sen} \phi) \hat{\mathbf{k}}, \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{h}} = & (\cos A \cos \vartheta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \lambda - \operatorname{sen} A \cos \vartheta \cos \lambda \\
& + \operatorname{sen} \vartheta \cos \phi \operatorname{sen} \lambda) \hat{\mathbf{i}} + (\cos A \cos \vartheta \operatorname{sen} \phi \cos \lambda \\
& + \operatorname{sen} A \cos \vartheta \operatorname{sen} \lambda + \operatorname{sen} \vartheta \cos \phi \cos \lambda) \hat{\mathbf{j}} \\
& + (-\cos A \cos \vartheta \cos \phi + \operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \phi) \hat{\mathbf{k}}. \quad (22)
\end{aligned}$$

El vector aceleración está dado por

$$\ddot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{v}} = \frac{d(v\hat{\mathbf{v}})}{dt} = v\dot{\hat{\mathbf{v}}} + \dot{v}\hat{\mathbf{v}}, \quad (23)$$

donde  $\dot{\hat{\mathbf{v}}}$  puede encontrarse al derivar la ecuación (21) con respecto al tiempo, la cual da, después de hacer algunas factorizaciones y tener en cuenta la definición de  $\hat{\mathbf{h}}$ ,

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{\mathbf{v}}} = & [(-\cos A \operatorname{sen} \vartheta \cos \phi \operatorname{sen} \lambda - \cos \vartheta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \lambda) \dot{\phi} \\
& + (-\cos A \operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \phi \cos \lambda - \operatorname{sen} A \operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \lambda \\
& + \cos \vartheta \cos \phi \cos \lambda) \dot{\lambda} + (\operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \lambda \operatorname{sen} A \\
& + \operatorname{sen} \vartheta \cos A \cos \lambda) \dot{A}] \hat{\mathbf{i}} + [(-\cos A \operatorname{sen} \vartheta \cos \phi \cos \lambda \\
& - \cos \vartheta \operatorname{sen} \phi \cos \lambda) \dot{\phi} + (\cos A \operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \lambda \\
& - \operatorname{sen} A \operatorname{sen} \vartheta \cos \lambda - \cos \vartheta \cos \phi \operatorname{sen} \lambda) \dot{\lambda} \\
& + (\operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \phi \cos \lambda \operatorname{sen} A - \operatorname{sen} \vartheta \cos A \operatorname{sen} \lambda) \dot{A}] \hat{\mathbf{j}} \\
& + [(-\cos A \operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \phi + \cos \vartheta \cos \phi) \dot{\phi} \\
& - \operatorname{sen} A \operatorname{sen} \vartheta \cos \phi \dot{A}] \hat{\mathbf{k}} - \vartheta \dot{\hat{\mathbf{h}}}. \quad (24)
\end{aligned}$$

Reemplazando en esta ecuación los vectores  $\hat{\mathbf{i}}$ ,  $\hat{\mathbf{j}}$  y  $\hat{\mathbf{k}}$  por los correspondientes vectores  $\hat{\mathbf{v}}$ ,  $\hat{\mathbf{h}}$  y  $\hat{\mathbf{a}}$  con ayuda de las ecuaciones (19) y (20) obtenemos, después de un breve proceso algebraico,

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{\mathbf{v}}} = & (-\cos A \dot{\phi} - \operatorname{sen} A \cos \phi \dot{\lambda}) \hat{\mathbf{h}} + [-\cos \vartheta \operatorname{sen} A \dot{\phi} \\
& - (\operatorname{sen} \vartheta \operatorname{sen} \phi - \cos \vartheta \cos \phi \cos A) \dot{\lambda} \\
& + \operatorname{sen} \vartheta \dot{A}] \hat{\mathbf{a}} - \vartheta \dot{\hat{\mathbf{h}}}. \quad (25)
\end{aligned}$$

Al reemplazar la ecuación (25) en (23) y utilizar las derivadas  $\dot{r}$ ,  $\dot{\phi}$  y  $\dot{\lambda}$  de las expresiones (14) a (16) encontramos,

$$\begin{aligned}
\ddot{\mathbf{r}} = & v \left\{ -\frac{v}{r} \left[ \hat{\mathbf{h}} + \tan \phi \operatorname{sen} A \operatorname{sen} \vartheta \hat{\mathbf{a}} \right] \operatorname{sen} \vartheta - \right. \\
& \left. \vartheta \dot{\hat{\mathbf{h}}} + \operatorname{sen} \vartheta \dot{A} \hat{\mathbf{a}} \right\} + \dot{v} \hat{\mathbf{v}}. \quad (26)
\end{aligned}$$

Por otra parte, tenemos que el vector aceleración relativo en el problema de los dos cuerpos puede expresarse, de acuerdo con las ecuaciones (3) y (20), como

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{k^2(1 + \frac{m_2}{m_1})}{r^2} (\cos \vartheta \hat{\mathbf{v}} + \operatorname{sen} \vartheta \hat{\mathbf{h}}).$$

Igualando las dos últimas ecuaciones encontramos

$$\dot{v} = -\frac{k^2(1 + \frac{m_2}{m_1})}{r^2} \cos \vartheta, \quad (27)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{k^2(1 + \frac{m_2}{m_1})}{r^2 v} \operatorname{sen} \vartheta - \frac{v \operatorname{sen} \vartheta}{r}, \quad (28)$$

$$\dot{A} = \frac{v \operatorname{sen} \vartheta \tan \phi \operatorname{sen} A}{r}. \quad (29)$$

Las ecuaciones (14), (15) y (16) junto con (27), (28) y (29) constituyen las seis ecuaciones diferenciales que describen el problema de los dos cuerpos.

### El Problema Principal del Satélite Artificial

En la terminología empleada en mecánica celeste la adición de más cuerpos o de otros tipos de fuerzas al modelo simple de los dos cuerpos se conoce con el nombre de perturbación, pues desde el punto de vista analítico muchos métodos de solución se apoyan en estudiar la evolución con el tiempo de la solución analítica (la cónica) cuando las nuevas fuerzas entran en consideración.

En el caso en que  $m_2$  se mueve cerca del cuerpo central  $m_1$ , i.e., donde  $r$  es del mismo orden de magnitud que el radio  $R$  de  $m_1$  ( $r/R > 1$ ) las asimetrías de masa que pueda tener este último juegan ya un papel importante en el movimiento de  $m_2$  pues el potencial pierde su dependencia exclusiva de  $r$  y se producen fuerzas de perturbación que alteran significativamente con el tiempo el movimiento de  $m_2$ .

El potencial de un cuerpo real puede representarse de la siguiente forma (Kaula, 1966)

$$V = -\frac{Gm_1 m_2}{r} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\operatorname{sen} \phi) T_{nm}(\lambda) \right], \quad (30)$$

donde  $P_{nm}(\operatorname{sen} \phi)$  son los polinomios asociados de Legendre y  $T_{nm}(\lambda) = C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \operatorname{sen} m\lambda$ , siendo  $C_{nm}$  y  $S_{nm}$  constantes adimensionales propias para cada cuerpo llamados coeficientes armónicos.

Cuando el centro de masas del cuerpo central se toma como el origen de coordenadas se obtiene  $C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0$ . Considerando la expansión hasta  $n = 2$ , haciendo explícita la simetría axial del problema y adoptando la notación  $J_2 = -C_{20}$ , llegamos a

$$V = -\frac{Gm_1m_2}{r} \left[ 1 - J_2 \left( \frac{R}{r} \right)^2 P_{20}(\text{sen}\phi) \right], \quad (31)$$

donde  $P_{20}(\text{sen}\phi) = \frac{1}{2}(\text{sen}^2\phi - 1)$ . En el caso de la mayoría de los cuerpos celestes a los cuales se les ha estudiado su campo gravitacional la consideración de expandir el potencial hasta  $n = 2$  se justifica en el sentido de que es el término que produce la mayor perturbación y por tanto domina el movimiento global del satélite. Por ejemplo, en el caso de la Tierra, el valor de  $J_2$  es al menos mil veces mayor que cualquiera de los restantes coeficientes (Seidelmann, 1992). Cuando se incluye como perturbación el término de  $J_2$  únicamente, el problema de encontrar el movimiento de  $m_2$  se conoce con el nombre de problema principal del satélite artificial.

La fuerza que se ejerce sobre la partícula de masa  $m_2$  debida a la partícula  $m_1$  puede representarse en términos del potencial como

$$\mathbf{F}_{21} = -\nabla V.$$

Cuando  $J_2 = 0$  se tiene el problema de los dos cuerpos que ya hemos estudiado. Igualando con la ecuación (2) y expresando el gradiente en términos de coordenadas esféricas encontramos

$$\frac{m_1m_2}{m_1+m_2} \ddot{\mathbf{r}} = - \left[ \frac{\partial V}{\partial r} \hat{\mathbf{r}} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \phi} \hat{\boldsymbol{\phi}} + \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} \hat{\boldsymbol{\lambda}} \right].$$

Al efectuar las derivadas parciales y factorar tenemos

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{k^2(1+\frac{m_2}{m_1})}{r} \left\{ \hat{\mathbf{r}} - \left( \frac{R}{r} \right)^2 J_2 [3P_{20}(\text{sen}\phi) \hat{\mathbf{r}} - P_{21}(\text{sen}\phi) \hat{\boldsymbol{\phi}}] \right\}, \quad (32)$$

donde  $P_{21}(\text{sen}\phi) = 3\text{sen}\phi \cos \phi$ .

Al reemplazar en (32) las ecuaciones (20) e igualar con (26) encontramos

$$\dot{v} = -\frac{k^2(1+\frac{m_2}{m_1})}{r^2} \left[ \cos \vartheta - \left( \frac{R}{r} \right)^2 J_2 (3P_{20}(\text{sen}\phi) \cos \vartheta - P_{21}(\text{sen}\phi) \text{sen} \vartheta \cos A) \right], \quad (33)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{k^2(1+\frac{m_2}{m_1})}{r^2 v} \left[ \text{sen} \vartheta - \left( \frac{R}{r} \right)^2 (3P_{20}(\text{sen}\phi) \text{sen} \vartheta + P_{21}(\text{sen}\phi) \cos \vartheta \cos A) \right] - \frac{v \text{sen} \vartheta}{r}, \quad (34)$$

$$\dot{A} = \frac{k^2(1+\frac{m_2}{m_1})}{vr^2} \left( \frac{R}{r} \right)^2 \frac{J_2 P_{21}(\text{sen}\phi) \text{sen} A}{\text{sen} \vartheta}$$

$$+ \frac{v \text{sen} \vartheta \tan \phi \text{sen} A}{r}. \quad (35)$$

Las ecuaciones (33), (34) y (35) junto con (14), (15) y (16) constituyen las ecuaciones diferenciales del problema principal del satélite artificial.

### La Relación entre las dos Clases de Variables

Mostraremos a continuación la relación existente entre las componentes cartesianas del vector posición y velocidad con las variables  $r$ ,  $v$ ,  $\vartheta$ ,  $\phi$ ,  $\lambda$  y  $A$ . Para  $r$  y  $v$  basta con aplicar las ecuaciones (6) y (7). De la definición del momentum angular encontramos,

$$\vartheta = \text{sen}^{-1} \left( \frac{h}{rv} \right). \quad (36)$$

De las ecuaciones (10) se deduce inmediatamente,

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{x}{y} \right), \quad (37)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right). \quad (38)$$

En la figura 4 es claro que el vector unitario  $\hat{\mathbf{h}}$  es perpendicular al plano de la órbita y su correlación con el momentum angular es inmediata. La relación entre los ángulos  $i$  y  $\Omega$  (llamados inclinación y longitud del nodo

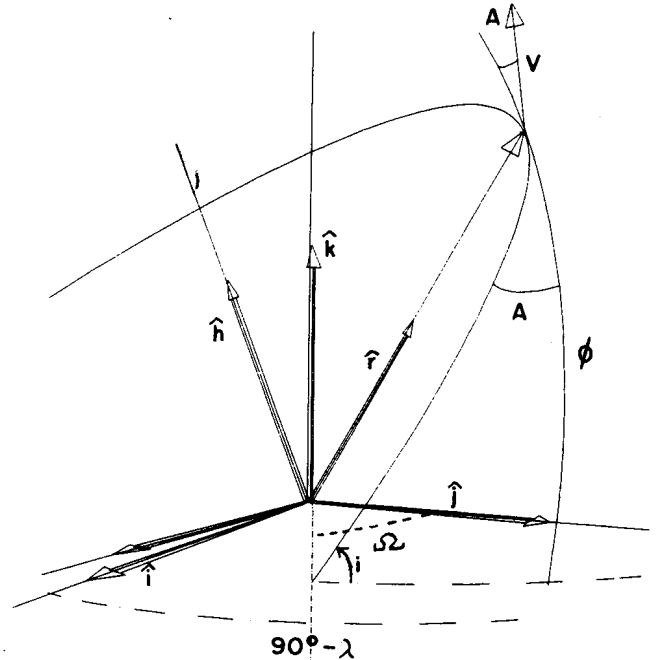


Figura 4



ascendente respectivamente) con  $\hat{\mathbf{h}}$  es

$$\hat{\mathbf{h}} = \cos \Omega \text{sen} i \hat{\mathbf{i}} - \text{sen} \Omega \text{sen} i \hat{\mathbf{j}} + \cos i \hat{\mathbf{k}}, \quad (39)$$

y puesto que  $\hat{\mathbf{h}} = \frac{\mathbf{h}}{h}$ , al igualar (39) con (8) se deduce

$$i = \cos^{-1} \left[ \frac{x\dot{y} - y\dot{x}}{h} \right], \quad (40)$$

$$\Omega = \tan^{-1} \left[ \frac{x\dot{z} - z\dot{x}}{y\dot{z} - z\dot{y}} \right]. \quad (41)$$

Al aplicar el teorema del seno en el triángulo esférico rectángulo mostrado en la figura 4 hallamos

$$A = \text{sen}^{-1} \left[ \frac{\text{sen} i \text{sen}(\Omega - \lambda)}{\text{sen} \phi} \right]. \quad (42)$$

Las relaciones inversas, esto es, pasar de  $r$ ,  $v$ ,  $\vartheta$ ,  $\phi$ ,  $\lambda$  y  $A$  para hallar  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  y  $\dot{z}$  son inmediatas, pues las componentes del vector posición son calculadas mediante (10) y las componentes del vector velocidad se hallan al reemplazar (14), (15) y (16) en (11).

## La Integración Numérica

Las ecuaciones diferenciales aquí expuestas están acopladas y su solución analítica completa no es posible. Sin embargo, en la práctica se puede hallar la solución de un problema en particular integrando las ecuaciones numéricamente. Tarea engorrosa hasta hace poco, la aparición de computadores veloces y baratos, software apropiado con asequibilidad a todos los campos de la educación y la investigación, han hecho que las integraciones numéricas sean relativamente fáciles de manipular aun para personas con escasos conocimientos matemáticos. Existen programas capaces de integrar en principio cualquier número de ecuaciones diferenciales simultáneas incluso de segundo orden. Un ejemplo de ello lo constituye el integrador RADAU (Everhart, 1985) especialmente diseñado para estudiar problemas de mecánica celeste. Pero existe más difusión de programas que integran sólo ecuaciones diferenciales de primer orden. Muy populares son los integradores de tipo Runge-Kutta y Burlish-Stoer cuyas subrutinas se encuentran en el Numerical Recipes (Teukolsky, 1992) escritos en lenguaje Fortran.

## Ejemplo

Consideremos como ejemplo el movimiento de un satélite artificial moviéndose en órbita baja alrededor de una tierra achatada pero despreciando la perturbación

producida por la resistencia del aire. Se conocen para el instante  $t=0$  las componentes del vector posición y velocidad del satélite en unidades de radio terrestre (1 radio terrestre,  $R.T.$ , = 6378.14 km) y radio terrestre por día ( $d$ ) respectivamente. Estas son:

$$x=0.5462983953,$$

$$y=0.9111710449,$$

$$z=0.0013483736,$$

$$\dot{x}=-55.3351031107,$$

$$\dot{y}=33.0662350579,$$

$$\dot{z}=81.4706722711,$$

que en términos de las variables aquí utilizadas corresponden a (los grados están en unidades de radianes):

$$r=1.0623918429,$$

$$v=103.8884978113,$$

$$\vartheta=1.5707114233,$$

$$\phi=0.0012691870,$$

$$\lambda=0.5400932308,$$

$$A=5.6138159950.$$

Se desea determinar las componentes del vector posición y velocidad de dicho satélite para 3.0 días después del tiempo inicial. Para ello hemos utilizado el integrador del tipo Burlish-Stoer (Teukolsky, 1992), que permite integrar ecuaciones diferenciales de primer orden simultáneas. Las ecuaciones a integrar son las (14), (15) y (16) junto con (33), (34) y (35). Tomamos como valor de  $k=107.0926758 R.T.^{3/2}/d$ . El integrador obtiene como resultado para  $t=3.0 d$  los siguientes valores:

$$r=1.0610938780,$$

$$v=103.9363177498,$$

$$\vartheta=1.5695154977,$$

$$\phi=-0.8149572259,$$

$$\lambda=1.8028679991,$$

$$A=5.1510316758,$$

que en coordenadas cartesianas corresponden a

$$x=0.7082928266,$$

$$y=-0.1673906127,$$

$$z=-0.7721540471,$$

$$\dot{x}=52.9919592658,$$

$$\dot{y}=84.1649329608,$$

$$\dot{z}=30.1806968154.$$

Al comparar con una integración numérica de las ecuaciones (32) realizada en el RADAU se obtienen resultados que difieren sólo hasta en la octava cifra decimal.

## Discusión

Es indudable que al considerar los problemas inherentes de la integración numérica (tiempo de CPU, re-

donde, pérdida de cifras significativas, sin considerar el problema logístico de la consecución de un computador o del programa integrador) muy pocos dejarían de utilizar la solución clásica analítica para sustituirla por métodos numéricos. Pero las ecuaciones de primer orden aquí expuestas se constituyen en una forma novedosa de estudiar el problema de los dos cuerpos en variables que son fáciles de visualizar. Poseen la ventaja de ser de primer orden lo cual permite la reducción de errores de dedondeo y pérdida de estabilidad. Además, pueden ser de utilidad desde el punto de vista pedagógico con el fin de comparar valores obtenidos analíticamente con los generados en una integración numérica. La introducción de cualquier fuerza adicional al problema de los dos cuerpos hace que las ecuaciones originales pierdan su integrabilidad. En el caso del problema principal del satélite artificial se puede expresar el problema en seis ecuaciones diferenciales de primer orden utilizando las ecuaciones de Hamilton en variables de Delaunay, pero esto implica haber resuelto de antemano el problema de dos cuerpos, pues en tal caso se está estudiando cómo cambia de forma y orientación la cónica en el espacio. Lo mismo se puede decir de la integración de las diez ecuaciones diferenciales de primer orden que resultan de aplicar la transformación KS a problemas perturbados (Stiefel y Scheifele, 1971). En las variables utilizadas en este trabajo es muy sencillo introducir diversos tipos de fuerzas tales como la resistencia del aire, el empuje derivado de pérdida de masa, etc. La adición de términos que dan cuenta de otros tipos de fuerzas a nuestras ecuaciones diferenciales del problema de dos cuerpos son extensamente usadas por investigadores en el estudio del movimiento de cohetes y misiles (Feeley y Speyer, 1993) así como también en el proceso de reentrada de meteoritos a la atmósfera terrestre (Baldwin y Sheaffer, 1971).

### Agradecimientos

El autor desea expresar su agradecimiento al profesor Eduardo Brieva por sus recomendaciones y sugerencias y a Mauricio Giraldo y William Cepeda por la elaboración de las figuras. Este trabajo ha sido financiado por el CIN-DEC de la Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, a través del proyecto 803116.

### Bibliografía

**Baldwin, B. & Y. Sheaffer.** 1971. Ablation and Breakup of Large Meteoroids During Atmospheric Entry. *J. Geophys. Res.* **76** (19): 4653-4668.

- Brouwer, D.** 1959. Solution of the Problem of Artificial Satellite Theory Without Drag. *Astron. J.* **64** (1274): 378-397.
- Brouwer, D. & G. Clemence.** 1961. *Methods of Celestial Mechanics*, Academic Press, Londres.
- Cowell, P. & A. Crommelin.** 1910. Investigation of the Motion of Halley's Comet From 1759-1910, Appendix to Greenwich Observations 1909, Neill, Bellevue, Londres.
- Everhart, E.** 1985. An Efficient Integrator That Uses Gauss-Radau Spacings. *Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution*, Carusi y Valsecchi (edi.): 185-202.
- Feeley, T. & J. Speyer.** 1993. Approximate Optimal Guidance for the Advanced Launch System. Nasa Contractor Report 4568.
- Garfinkel, B.** 1959. The Orbit of a Satellite of an Oblate Planet. *Astron. J.* **64** (1274): 353-367.
- Goldstein, H.** 1963. *Mecánica Clásica*, Aguilar Ediciones, Madrid.
- Irigoyen, R. & C. Simó .** 1993. Non Integrability of the  $J_2$  Problem. *Cel. Mech. & Dyn. Astron.* **55** (3): 281-287.
- Kaula, W.** 1966. *Theory of Satellite Geodesy*, Blaisdell Publ. Comp., Waltham, Massachusetts.
- Kinoshita, H. & H. Nakai.** 1989. Numerical Integration Methods in Dynamical Astronomy. *Cel. Mech. & Dyn. Astron.* **45** (3): 231-244.
- Kinoshita, H. & H. Yoshida.** 1991. Symplectic Integrators and their Application to Dynamical Astronomy. *Cel. Mech. & Dyn. Astron.* **50** (1): 59-71.
- Kosai, Y.** 1959. The Motion of Close Earth Satellite. *Astron. J.* **64** (1274):367-377.
- McCuskey, S.** 1963. *Introduction to Celestial Mechanics*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Seidelmann, P. K.** 1992. *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, University Science Books, Mill Valley, California.
- Standish, E.** 1982. The JPL Planetary Ephemerides. *Cel. Mech. & Dyn. Astron.* **26** (2): 181-186.
- Stiefel, E. & G. Scheifele.** 1971. *Linear and Regular Celestial Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin.
- Teukolsky, S.** 1992. *Numerical Recipes en Fortran*, Cambridge Uni. Press, New York.

# HUMAN TUMOR RESPIRATION<sup>1</sup>

Por

Carlos Corredor\*, Cecilia de Plata\*\*, Jorge Badel\* and Julio Cesar Montoya\*\*<sup>2</sup>

## Resumen

Corredor, C., de Plata, C., Badel, J. & J. C. Montoya.: Human Tumor Respiration. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 33-45, 1996, ISSN 0370-3908.

71 tumores humanos malignos y 20 benignos fueron estudiados en relación con su capacidad de utilizar oxígeno con sustratos endógenos o con glucosa, glutamina o una mezcla de las dos como sustratos. Se encontró que los tumores consumen oxígeno en forma muy similar a la de los tejidos peritumorales que fueron ablados en la misma operación quirúrgica. No se encontró diferencia en el consumo de glucosa o de glutamina por los tumores, pero se constató que la glutamina disminuía la captación de glucosa, mientras que la glucosa aumentaba la captación de glutamina. Se demostró que la marca radioactiva de la glucosa podía aparecer en CO<sub>2</sub>, constatando que no hay una ruptura completa entre glicólisis y ciclo de ácidos tricarbóxicos en tumores humanos. Se propone que el aumento en lactato típico de los tumores puede ser debido a inhibición de los transportadores de equivalentes reducidos del citoplasma a la mitocondria acompañado de un descontrol de la enzima fosfofructocinasa.

**Palabras claves:** Tumores humanos - respiración.

## Abstract

71 malignant and 20 benign human tumors were tested as to their capability of oxygen utilization using endogenous substrates or either glucose or glutamine or a combination of these two energy substrates. It was found that tumor oxygen uptake did not differ significantly from that of peritumoral tissues excised in the same surgical procedure. No difference was found in glucose and glutamine uptake between tumoral and peritumoral tissues, but it was shown that glutamine decreases glucose uptake while glucose increases glutamine uptake in tumors. It was demonstrated that the radioactive label from glucose could be found in CO<sub>2</sub> showing that there is not a complete uncoupling of glycolysis and tricarboxylic acids cycle in human tumors. It is proposed that the typical increased lactate production in tumors might be due to inhibition of reduced equivalent shuttles between cytoplasm and mitochondria concomittant with a non-controlled phosphofructokinase.

**Key words:** Human tumor - respiration.

<sup>1</sup> This project was financed in part through a grant from COLCIENCIAS to the first author and by Universidad del Valle

<sup>2</sup> \*Miembro de Número, Academia Colombiana de Ciencias. Dirección actual: Decanato, Facultad de Ciencias, Universidad Javeriana, Bogotá. \*\*Departamento de Bioquímica, Facultad de Salud, Universidad del Valle. \*Dirección actual: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Palmira

## Introduction

During close to two decades, **Warburg** (1930) carried out very careful experiments in order to establish the metabolic difference between normal and cancer cells. In the process he designed new methodology to measure oxygen uptake by manometric techniques and to determine the amount of lactate produced by tissues. Warburg mainly used animal tumors for his experiments, even though he reported a few with human tumors. His findings can be summarized saying that tumors differ from normal cells in that the former use significantly greater amounts of glucose and concomitantly produce larger amounts of lactate, i.e., tumors seem to be essentially glycolytic while normal cells are aerobic. This, of course, does not mean that tumors do not use oxygen, and in fact, Warburg did some experiments in which he showed tumor oxygen uptake. From his findings, **Warburg** (1956) advanced a theory according to which cancer was the result of a metabolic alteration in normal cells which somehow impaired their respiratory machinery. According to this theory, only cells which were able to switch from aerobic respiration to anaerobic glycolysis could survive and were released from normal growth control allowing them to proliferate uncontrolled. Even though this theory was soon proved to be invalid, the notion that tumors are essentially anaerobic has remained latent even to this day.

That tumor cells had the necessary enzymes for aerobic respiration was first shown by **Weinhouse** (1955). Several other workers confirmed these findings during the following years (**Wenner & Mackner**, 1967; **Weber**, 1977). **Weber** (1971), working with a series of Morris hepatomas, was able to show that neither respiration nor glycolysis were altered in well differentiated slow-growth hepatomas. **Koukl et al.** (1977) showed that tumor mitochondria had bizarre forms and **Villalobos** and **Lehninger** (1979) showed that Ehrlich's ascites mitochondria had the same proton transport stoichiometry as heart and liver mitochondria.

The production of large amounts of lactic acid from glucose in the presence of oxygen, characteristic that has been called aerobic glycolysis, is not limited to cancer cells. In fact, some normal tissues, such as chicken and rat embryos, retina, brain cortex, renal medulla, bone marrow and placenta, may also exhibit this type of metabolic trait (**Pedersen**, 1978).

Aerobic glycolysis seems to be a metabolically wasteful process. A quick calculation shows that in the process of converting a mole of glucose aerobically to  $\text{CO}_2$

and  $\text{O}_2$ , between 36 and 38 moles of ATP are formed. The difference, of course, depends on whether the glycerolphosphate or the malate shunts are used to reoxygenize the NADH produced in glycolysis. Even if we take the lower ATP production and compare it with the two moles of ATP formed when a mole of glucose is converted to lactate, we find that the latter process is only 5.6% as efficient as respiration. For a tissue that is supposed to have high energy requirements, this seems to be a disadvantage *vis a vis* normal tissues.

This line of reasoning led some workers to propose that tumors must consume far greater amounts of glucose than normal tissues in order to meet their energy requirements, resulting in the starving of other tissues and contributing to cancer cachexia (**Gold**, 1974). This is, of course, an attractive hypothesis. However, one can easily calculate that in order to meet basal metabolic needs a tumor tissue would have to consume almost 18 times as much glucose as a normal comparable tissue. This, however, has not found experimental confirmation (**Ahmed et al.**, 1993).

If the amount of glucose used by most tumors is not significantly different from that utilized by normal tissues and tumor cells have a normal and functional complement of respiratory enzymes, one must suppose that a) there must be some alteration in cytoplasmic enzymes or mitochondrial transporters that would somehow channel pyruvate to lactate at the expense of acetyl-CoA production and b) tumor cells must be able to use respiratory substrates such as fatty acids and aminoacids to meet their energy needs.

Several workers have addressed the issue of glycolytic enzymes in cancer cells. On the whole, there seem to be alterations in enzyme kinetics and make-up, most of which are somehow reminiscent of those found in early stages of development. **Newsholme** and his group (1990) studied maximal activities of key control enzymes in glycolysis, pentose-phosphate shunt and tricarboxylic acid cycle in normal and neoplastic cells. They showed that pyruvate kinase activity from the latter was far larger than that found in muscle. They also showed that neoplastic cells had a full complement of functional Krebs cycle enzymes. **Goldman et al.** (1964) studied the lactate dehydrogenase from a large amount of normal and neoplastic tissues. They found that the activity was greater in the tumor cells and that they all seemed to have M type subunits, which is consistent with the conversion of pyruvate to lactate. These, and other findings (**Rasschaert** and **Malaisse**, 1993; **Board et al.**, 1995) only show, how-

ever, that the enzymes concerned can handle an increased glycolytic flux, but do not explain what causes it.

It could be postulated that the increased lactate production could be due to an accumulation of pyruvate due to an impairment of either pyruvate dehydrogenase activity or of the mitochondrial membrane transport system for that ketoacid. **Lazo and Sols (1980)** showed that the pyruvate dehydrogenase complex in Ehrlich ascites tumor cells exhibited greatly reduced activity as compared to normal cells. He also showed (**Lazo, 1981**) that only 1.5% of the glucose taken up went to the tricarboxylic acid cycle and 2% to lipids. These findings, however, have not been substantiated for other tumors. For instance, **Portais et al., (1993)**, showed that 78% of the lactate and 57% of the acetyl CoA came from glucose in C6 glioma cells and there are reports (**Briscoe et al., 1994**) that experimental hepatoma cells have both high glycolytic and lipid synthesis rates.

**Newsholme (1990)** also showed that glutaminase activity of tumor cells was just as large as that of glucokinase, suggesting that glutamine can be used quite well by tumor cells. In fact, several authors had shown that glutamine or glutamate could be used by tumor cells (**Kovacevic, 1971; Kovacevic & Morris, 1972; Reitzer et al., 1979; Lazo, 1981; Moreadith and Lehninger, 1984**) and **Souba (1993)** has suggested that tumors are actually "glutamine traps" which lead to depletion of the metabolite *in vivo* from other tissues. This is an interesting finding since it suggests that tumors can at the same time use glycolytic and respiratory substrates. The question raised by this realization is, of course, whether or not glycolysis and respiration are uncoupled or whether the tricarboxylic acid cycle is somehow truncated, and acetyl CoA from pyruvate cannot be oxidized in it. Evidence in this sense is not conclusive: **Reitzler (1979)** found that less than 5% of the glucose available to HeLa cells enters the tricarboxylic acid cycle, while 35% of the glutamine is converted to CO<sub>2</sub>, 25% is incorporated into proteins and 13% go to lactate. On the other hand, **Dietzen and Davis (1993)** provided evidence that the tricarboxylic acid cycle is not truncated in hepatoma mitochondria. **McKeehan (1982)** proposed that glutamine could be metabolized in a fashion similar to glucose in normal tissues: glutamine would be deaminated to glutamate which would be oxidized in turn to  $\alpha$ -ketoglutarate. The keto acid would then continue through the cycle to malate which would go out of the mitochondria and be converted to pyruvate and lactate in cytoplasm. If this were to apply to tumors *in vivo*, it would be possible that circulating glutamine would contribute both to respiration and to

the lactate production. **Moreadith and Lehninger (1984)**, while finding that glutamine and glutamate were excellent respiratory substrates for Ehrlich ascites tumor cells, showed, however, that they did not contribute to lactate production and were rather converted to aspartate. **Ahmed et al. (1993)** suggest that the high rates of both glycolysis and glutaminolysis in tumors, coupled with a depressed oxidative glucose-phosphate shunt are consistent with the hypothesis that neither glucose nor glutamine contribute greatly to energy metabolism but rather are precursors for nucleic acids and protein synthesis.

Most of the data available is derived from work with animal tumors or human tumoral cell-lines maintained *in vitro*. While it is legitimate to extrapolate such findings to human tissues, we thought that it was important to readdress the issue using human tumors. We first wanted to find out unequivocally whether or not human tumor cells were able to respire and whether their respiratory rate differed from that of normal tissues. In case that the respiratory rates were high enough, would the uptake of glucose, glutamine, or of a combination of these substrates account for the oxygen uptake? Finally, what is the extent of glucose and glutamine oxidation to CO<sub>2</sub>? The experiments reported here were carried out in the biochemistry department of Universidad del Valle.

## Materials and Methods

### Tumors

71 malignant and 20 benign tumors were studied over this period, as follows: Carcinomas: mammary, 32; gastric 11; Thyroid papillary, 3; follicular, 3; Epidermoid, 3; Basocelular, 2; meningioma, 3; ovarian, 3 and one each from cervix, colon and vulva; one Edwin carcinoma and one adenofibroma. Sarcomas, 3: fibrosarcoma, liposarcoma and osteosarcoma. The tumors were obtained from programmed surgical procedures at the Hospital Universitario del Valle. The excised tumoral tissue was divided in two portions at the operating room, one for Pathology and the other one for these studies. This portion was immediately placed in ice-cold Krebs Ringer Phosphate (KRP), pH 7.4. Some macroscopically healthy tissue surrounding the visible limits of the tumor was always excised, and this was used as control. The tumoral or "healthy" status of the tissues used was later confirmed by pathology. 41% of the tumors studied were mammary infiltrating ductal carcinomas, 15% were gastric carcinomas and the rest were mostly carcinomas from different tissues. Only 6% were sarcomas. No attempt

was made to study one single kind of tumoral tissue, because we wanted to have as large a representation of transformed tissues as possible.

### Oxygen uptake

Oxygen uptake was measured manometrically in a Warburg apparatus (Umbreit *et al.*, 1957). All experiments were performed in triplicate, as long as there was enough tissue to place between 70 and a 100 mg in the flask. This was not always the case, particularly with peritumoral tissues which were normally a lot smaller than the tumors. This, of course, was to be expected, as the surgeon will excise as little normal tissue as possible, insuring the removal of all the malignant cells. All flasks contained 3 ml of KRP pH 7.4 containing enough substrate to give a final concentration of either D-glucose, 5 mM; L-glutamine, 0.58 mM or a combination of the two, depending on the experiment performed. When no substrate was used, the flask contained only KRP. The center well contained 40% KOH mostly absorbed in a fluted filter paper, in order to catch any CO<sub>2</sub> produced. Approximately 100 mg of tissue was blotted dried, weighed and cut in 1 mm slices. The slices were placed in the Warburg flasks which were, then, connected tightly to the corresponding manometer and placed in the bath at 30° C. The two arms of the manometers were equilibrated, the valve connecting to the atmosphere shut and agitation at 80 r.p.m. was initiated. Readings were made at one hour intervals for 4 hours. After each reading, the valve connecting to the atmosphere was open and the manometer was allowed to equilibrate. In all cases there was a thermobarometer containing only KRP.

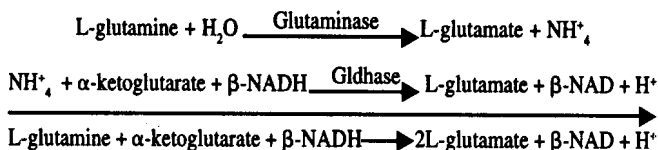
### Substrate uptake

Substrate uptake was ascertained by determining the amount of substrate present in the incubation medium before and after four hours of incubation. Substrate uptake is not equivalent to substrate use, since some of it may be adsorbed to the cell membranes and some may accumulate as such in the cell. However, it does reflect the amount left available in solution after incubation.

Glucose was measured by the glucose oxidase method, utilizing Merck's commercial kit. The suggested procedure was modified in the following manner: 50 µl of the solution to be measured were added to 1 ml of the color reagent containing the enzymes, diluted 1:2 with bidistilled water. After mixing, it was incubated for 30 minutes at 37° C without shaking. Absorbancy at 510 nm was read in a spectrophotometer against a blank prepared

and incubated in exactly the same way, but with 50 µl bidistilled water instead of sample. Standard curves were prepared to ascertain that Beer-Lambert's law held for the concentrations measured and the glucose concentration was read of the corresponding curve.

There is no good enzymatic method for the determination of glutamine. For this reason we finally had to develop a reliable coupled enzyme procedure based on the following reactions:



In this coupled enzyme reaction for each mole of glutamine converted to glutamate, a mole of NADH will be converted to NAD. The conversion of NADH to NAD can be followed spectrophotometrically at 340 nm. We found, however, that this was not a straight-forward procedure in which both enzymes could be present in the same reaction mixture, as it is usually the case with coupled enzyme systems, due to the fact that the pH and temperature optimum of the glutaminase and the glutamate dehydrogenase are widely divergent. Therefore, we first incubated the assay mixture for one hour at 37° C with glutaminase after adjusting the pH to 4.0 with HCl. Next, the pH was raised to 8.0 with NaOH and both glutamate dehydrogenase, α-ketoglutarate and β-NADH were added and the resulting mixture was incubated at 25°C for 90 minutes. The procedure was as follows: In a final volume of 380 µl there were 100 µl of sample and the following substances to give final concentrations of 2 mM HCl; 0.22 M acetate buffer, pH 5.0, and 0.3 U glutaminase. The mixture was incubated in a spectrophotometer cell at 37° C for 1 hour. At that time, the reaction was stopped by addition of 20 µl concentrated NaOH. Next, the following reagents were added to obtain the final concentrations indicated: 0.1 M TRIS buffer, pH 8.0; 10 mM α-ketoglutarate and 0.24 mM β-NADH. The mixture was shaken and L-glutamate dehydrogenase was added to obtain a final concentration of 6 U/ml. Final reaction mixture was 1 ml. The reaction was followed by recording the absorbancy at 340 nm in a Gilford Response spectrophotometer at 25° C for 90 minutes. Standard curves were run at regular intervals. The procedure was found to be accurate for the small concentrations involved in the experiments.

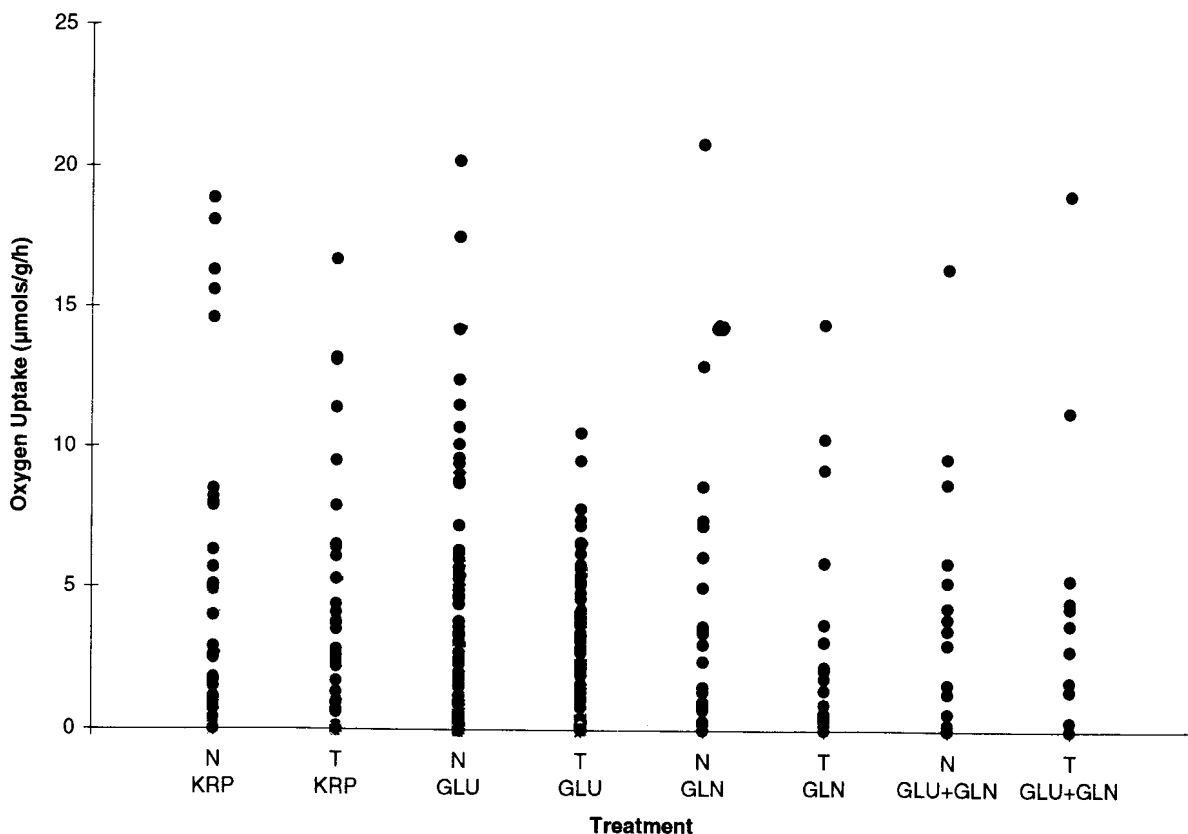
### CO<sub>2</sub> production

CO<sub>2</sub> production was measured by incubating the tissues with radioactive substrates as follows: 3.0 ml of KRP pH 7.4 containing either 5 mM U-C<sup>14</sup> glucose or 0.58 mM U-C<sup>14</sup> glutamine (2 x 10<sup>6</sup> cpm) were added to 25 ml erlenmeyers that had been previously fitted with glass center wells. In the wells were placed smaller removable empty glass or hard plastic wells. 70-100 mg sliced tissue were then added to the reaction mixture, the flasks were tightly stoppered with vaccine rubber stoppers and incubated with shaking for 4 hours at 30° C in a Dubnoff shaking bath. At the end of the 4 hours, hyamine hydroxide was injected through the stopper into the removable center well and then the flasks were placed in an ice-cold bath overnight to insure that all CO<sub>2</sub> was taken up by the hyamine hydroxide. The center wells were then removed and placed in a scintillation vial containing 5

ml Bray's solution. The radioactivity was measured in a Beckman Scintillation Counter.

### Results

In figure 1 we can observe the oxygen consumption of the tumors and of the corresponding peritumoral tissues studied in the absence of substrate or using glucose or glutamine as substrates after one hour of incubation. The most striking feature is the very great variation of values which, nevertheless, tend to group around certain values, with occasional greatly deviant figures. For this reason, our results will be presented as the median of the values found and their range. We believe that the great dispersion in O<sub>2</sub> uptake figures is due to several factors. There was a large variety in tumor types studied and in the degree of dedifferentiation. Most of the tumors studied were mammary



**Figure 1.** Oxygen consumption by different types of human tumors. Tumor slices were incubated in KRP buffer without any substrate or in buffer containing 5.0 mmoles glucose/ml or 0.58 mmoles glutamine/ml. Oxygen uptake was measured manometrically in a Warburg apparatus. (GLU = glucose; GLN=glutamine)

tumors in which there necessarily it is found a mixture of normal and cancer cells. And in some of the solid tissues, there might be dead cells along with very active ones. Independent of this variation, which was to be expected, what one observes is that there is little if any differences in  $O_2$  uptake between the peritumoral and tumoral tissues. The lack in statistically significant differences between normal and tumoral tissues was confirmed using the Mann-Whitney non parametric test which assumes that the events studied are in-

dependent. This test is generally used in cases where a great dispersal of values is observed.

In table I is shown the median of the  $O_2$  uptake values found in all experiments, and the range of the figures. As can be seen, there is no apparent significant difference in the medians. However, there is a tendency for the tumors to respire a little less than the peritumoral tissues. This tendency is more pronounced in the case when glutamine was used as substrate.

**Table I. OXYGEN UPTAKE BY TUMORAL TISSUES**

	Peritumoral	Tumoral	Peritumoral	Tumoral	Peritumoral	Tumoral
	KRP		GLUCOSE		GLUTAMINE	
	$\mu\text{moles } O_2 / \text{g.h}$					
Median	3.5	3.6	3.0	2.8	3.4	2.1
Range	0.14 - 18.9	0.10 - 16.7	0.20 - 20.2	0.03 - 10.5	0.20 - 20.8	0.16 - 18.1

In order to ascertain if the general tendency found with different types of tumors, both benign and malignant, held also for the two types, we grouped them as to malignancy or non-malignancy. In table II the medians and ranges

for both types of tissues are shown. As can be seen, no significant differences are found. The only difference seems to be that the dispersion of values is less apparent in benign tumors.

**Table II. OXYGEN UPTAKE BY MALIGNANT AND BENIGN TUMORS**

	MALIGNANT				BENIGN			
	Peritumor	Tumoral	Peritumor	Tumoral	Peritumor	Tumoral	Peritumor	Tumoral
	KRP		GLUCOSE		KRP		GLUCOSE	
	$\mu\text{moles } O_2 / \text{g.h}$							
Median	3.45	3.70	3.05	3.10	3.45	3.0	1.65	1.4
range	0 - 18.9	0.1- 16.7	0.2 -20.2	0.03 -10.5	0.4-15.6	0.7-6.4	0.5-7.2	0.3-5.2

We next wanted to ascertain whether or not one could find a different pattern of  $O_2$  uptake for a single type of tumors. In order to do that, we grouped the 22 experiments in which only mammary tumors

were used with both substrates. The results are shown in Table III. As can be seen, the tendency remains, and we found no statistically significant difference between the figures.



Table III. OXYGEN UPTAKE BY MAMMARY CARCINOMA

	Peritumoral	Tumoral	Peritumoral	Tumoral	Peritumoral	Tumoral
	KRP		GLUCOSE		GLUTAMINE	
	$\mu\text{moles O}_2/\text{g.h}$					
Median (30)	2.75	3.7	2.4	2.75	1.65	3.4
Range	1.14 - 18.1	0.10 - 13.2	0.20 - 11.5	0.11 - 10.5	0.30 - 20.8	0.16 - 18.1

We next wanted to know whether or not simultaneous incubation of glutamine and glucose resulted in a different pattern of oxygen uptake. As can be seen in Table IV, it would seem that tumors res-

pire better with glutamine than with glucose alone. The dispersion of the values, however, does not permit to determine whether or not this tendency is statistically significant.

Table IV. OXYGEN UPTAKE IN THE PRESENCE OF BOTH GLUCOSE AND GLUTAMINE

	Peritumoral	Tumoral	Peritumoral	Tumoral	Peritumoral	Tumoral
	GLUCOSE		GLUTAMINE		GLUCOSE + GLUTAMINE	
	$\mu\text{moles O}_2/\text{g.h}$					
Median	2.4	2.75	1.65	3.4	3.7	4.0
Range	0.20 - 11.5	0.11 - 10.5	0.30 - 20.8	0.16 - 18.1	0.02 - 16.4	0.30 - 19.0

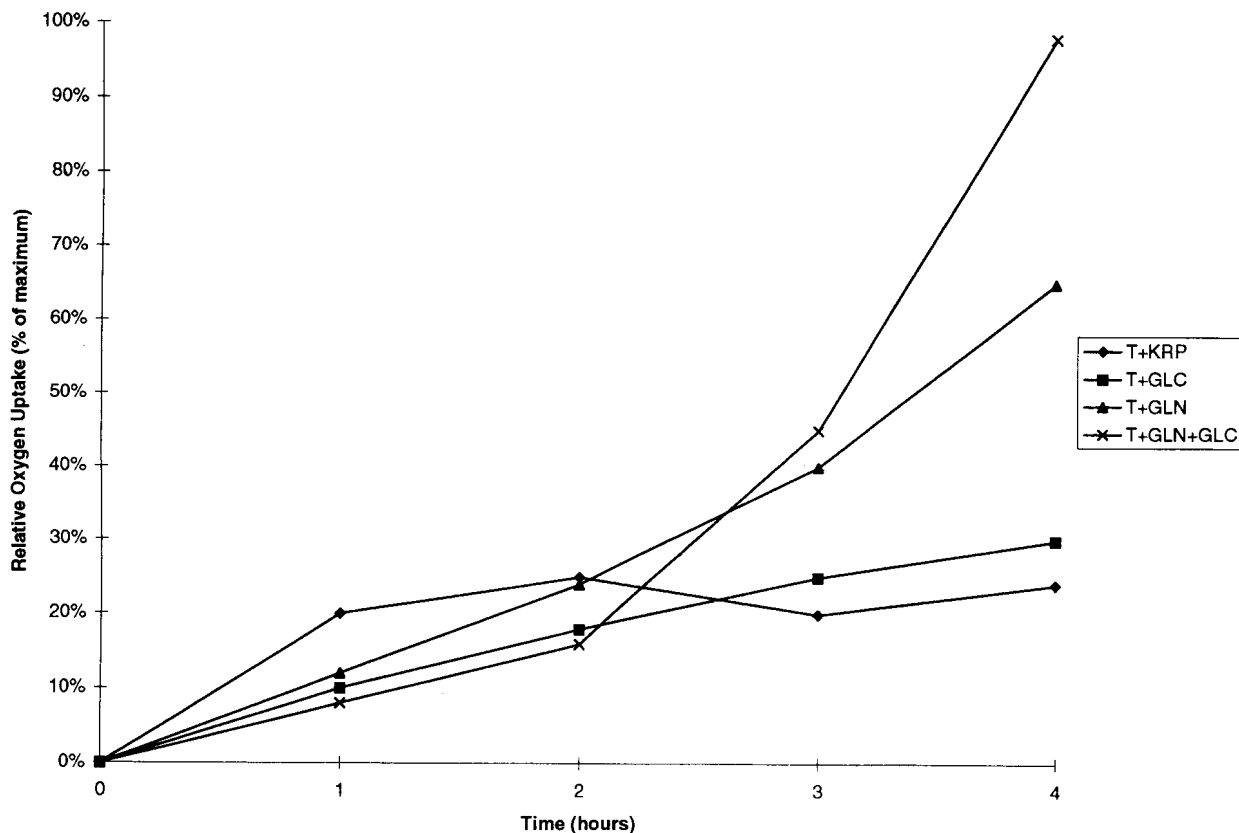
It was interesting to note that tumors respired seemingly well in the absence of exogenous substrate during the first hour. As can be seen in figure 2, however, this did not hold for longer incubation periods. In fact, both normal (not shown) and cancer tissues without substrate practically stopped respiring after the third hour, while those with substrate continued to respire, albeit not at the same rate. In fact,

glucose maintained tumor respiration almost constant during the four hours. Glutamine did the same, but at a higher rate, while a mixture of glucose and glutamine resulted in maximal  $\text{O}_2$  uptake.

The amount of substrate used was determined after four hours incubation. In table V we show the amount of glucose taken up by the tissues under these conditions.

Table V. GLUCOSE UPTAKE BY TUMORAL TISSUES

SUBSTRATE	GLUCOSE		GLUCOSE + GLUTAMINE	
	PERITUMORAL	TUMORAL	PERITUMORAL	TUMORAL
	$\mu\text{moles}/4 \text{ hrs/g tissue}$			
means (N)	10.21 (23)	6.17 (23)	7.24 (16)	4.66 (13)
S.D.	6.74	5.56	4.76	4.21



**Figure 2.** Tumoral tissues were incubated for four hours in KRP alone or with glucose, 5 mM, glutamine, 0.58 mM, or with a mixture of both. The oxygen uptake was measured each hour in a Warburg respirometer. Results are presented as percent of the maximal value obtained.

Even though the mean value of glucose uptake by the tumoral tissue when glucose is the only substrate seems to be less than that of the peritumoral one, the difference is not statistically significant. The same is true when both glucose and glutamine are used by the tissues at the same time. However, in this case, the Student t test does show a significance at the 0.1 level.

In the same manner we determined the glutamine uptake by the tissues after four hours incubation. As can be seen in Table VI, tumoral tissues appeared to take up more glutamine than peritumoral tissues both in the presence and in the absence of glucose. This difference, however, is not statistically significant, and simply shows a trend.

**Table VI. GLUTAMINE UPTAKE BY TUMORAL TISSUES**

SUBSTRATE	GLUTAMINE		GLUTAMINE + GLUCOSE	
	PERITUMORAL	TUMORAL	PERITUMORAL	TUMORAL
	$\mu\text{moles}/4 \text{ hrs/g tissue}$			
means (N)	1.13 (11)	2.43 (11)	2.27 (10)	2.92(12)
S.D.	0.63	0.93	1.93	2.69

In order to find out whether or not tumors were able to convert glucose to CO<sub>2</sub> and in this way to ascertain if there was inhibition of pyruvate entrance into the Krebs cycle, we incubated several tumor tissues with U-C<sup>14</sup>-glucose and collected the CO<sub>2</sub> produced. We also incubated them with U-C<sup>14</sup>-glutamine to find out the proportion of the label appearing in CO<sub>2</sub> in relation to that produced by peritumoral tissues. In table VII we show a typical experiment using carcionoma from cervix. As expected, tumors took up more glucose than peritumoral tissues, even in the presence of non radioactive glutamine. However, it was surprising to find that tumors took up almost double the amount of glutamine than the peritumorals did. The most

interesting thing that can be observed in the table is that tumors do produce CO<sub>2</sub> from glucose, and that even though the extent is less than the peritumoral tissue, it is a sizable proportion of the normal. In other experiments the pattern was reproduced, but the proportion of CO<sub>2</sub> produced by the tumor in relation to that produced by the peritumoral tissue varied greatly, even though it always was less. On the other hand, the proportion of glutamine that went to CO<sub>2</sub> in this experiment was similar for both peritumoral and tumoral tissues, just as it would be expected. It should be noted that glucose seemed to increase the CO<sub>2</sub> produced from glutamine, while this latter substrate seemed to reduce the amount of CO<sub>2</sub> produced from glucose.

Table VII. RADIOACTIVE SUBSTRATE UPTAKE AND CO<sub>2</sub> PRODUCTION BY CERVICAL CARCINOMA

SUBSTRATE	RADIOACTIVITY UPTAKE		C <sup>14</sup> O <sub>2</sub> PRODUCED	
	PERITUMORAL	TUMORAL	PERITUMORAL	TUMORAL
	CPM		μmoles/g	
Glucose-U-C <sup>14</sup>	49793	64188	16.2 ± 7.5	10.4 ± 2.2
Glutamine-U-C <sup>14</sup>	57569	103722	1.6 ± 0.8	1.5 ± 0.3
Glucose-U-C <sup>14</sup> + Glutamine	70107	107582	11.7 ± 6.3	8.2 ± 1.7
Glutamine-U-C <sup>14</sup> + Glucose	54579	26257	1.5 ± 0.4	3.3 ± 1.0

## Discussion

Ever since Warburg (1930) showed that tumors had a high rate of lactate production many workers have tried to find out whether or not they have the necessary metabolic respiratory machinery. Weinhouse (1955) was the first to show in a series of systematic experiments that the enzymes of the respiratory chain were present and active in tumor cells. Confirmation followed shortly thereafter (Wenner & Mackner, 1967; Weber, 1977). However, some workers, based on Koukl *et al.* (1977) ultramicroscopic findings that tumor mitochondria had bizarre forms, proposed that due to morphological alterations the enzymes would not be active *in vivo*. Villalobos and Lehninger (1979) showed that this was not the case, since Ehrlich's ascites mitochondria had the same proton transport stoichiometry as heart and liver mitochondria. Dietzen and Davis (1993) showed that mitochondria isolated from AS-30D hepatoma cells

oxidized many NAD-linked respiratory substrates at rates 1.5 to 4 times faster than those from liver. These findings clearly demonstrate that there is nothing wrong with the respiratory machinery of tumors.

However, most experiments to date have been performed using animal tumors or human tumor cell lines. Due to the relative ease of obtaining animal dedifferentiated tissues and of maintaining cell lines *in vitro* as well as to the differences between tumor types, this approach is entirely appropriate and, in fact, preferable for certain purposes. Nevertheless, the question remains open as to whether or not human tumor tissues participate of the features found in animal ones or *in vitro* maintained cell lines, since the latter conceivably could have acquired metabolic features not necessarily found in the original cells.

For this reason we decided to work with fresh human tumor tissues and first ascertain in them the rates of

respiration using either glucose or glutamine as substrates. Even though all tissues were obtained from programmed surgical procedures, it proved very difficult to obtain enough tumoral and apparently healthy peritumoral tissues for reasons that included from the tumors being so small that there was not enough tissue both for pathological examination and for our experiments to the placing of the tumor in formaldehyde immediately after excision by the surgeon helper, thus preventing further experimentation. However, we were able to collect 71 malignant and 20 benign tumors over a period of five years. Due to the differences reported in the literature about certain particular metabolic features between different animal tumors and cell lines, we thought that the one feature that seemed to cover all tumoral tissues was the fact that they exhibited aerobic glycolysis. Therefore, we felt that it would be important to ascertain the rate of oxygen uptake in the presence of glucose or glutamine regardless of the tumor type.

The next decision was a bit more difficult to take. For the past 30 years oxygen electrodes have been available to measure oxygen in solution. While highly appropriate for measuring  $O_2$  uptake by mitochondria, we felt that it would be better to follow respiration for longer periods than those that could be possible using oxygen polarimetry. Therefore, we decided to use the Warburg manometric respirometer in order to measure  $O_2$  uptake for hours. In some preliminary experiments we went up to 48 hours incubation, finding greatly increased  $O_2$  consumption at about 16 hours, that, however, was finally shown to be due to bacterial contamination. For this reason, all experiments reported here were performed with sterilized materials and with solutions passed through micropore filters and were limited to 4 hour incubations since we could not find any contamination until this time. Even though we did not pursue the issue, one very strange feature was that peritumoral tissues were very little subject to bacterial contamination in exactly the same incubation conditions. This observation could mean that somehow tumors are more susceptible to bacterial infection.

Even though we measured  $O_2$  uptake for four hours, we only present the results for the first hour. As can be seen in figure 2,  $O_2$  uptake was maintained approximately constant only in tumors in the presence of glucose or glutamine. In all other cases  $O_2$  uptake declined with time. We do not know whether this is due to some enzymic inactivation with time under our conditions. The interesting thing, however, is that glucose, glutamine or a combination of the two were able to increase or at least

keep the rate of respiration nearly constant in the tumor, albeit at different rates. In this sense, the work of Eskey *et al.* (1993) may be relevant. In fact, these authors ascertained the relative contributions of glycolysis and respiration in tumor energy metabolism using *in vivo*  $P^{31}$  NMR spectroscopy. They found that the nucleotide triphosphate (NuTP)/ $P_i$  ratio is maintained in tumors in hypoxia, but it is not maintained when glucose is removed from the medium or is replaced by glutamine. Our findings, on the contrary, suggest that the increased oxidation could result in a higher NuTP/ $P_i$ , unless there was uncoupling of oxidative phosphorylation in tumors. This could be possible if tumor mitochondria had a lower  $Ca^{++}$  content than normal mitochondria, since Gabai (1993) has shown that endogenous and glutamine-supported respiration as well as succinate-supported respiration was  $Ca^{++}$  dependent. At any rate, we decided to report  $O_2$  uptake for the first hour only in order to make all treatments more comparable.

As reported in Tables I, II and III, the most prominent feature found in tumors as relate to respiration is that there is no statistically significant differences in  $O_2$  uptake between the peritumoral and the tumoral tissues, respiring with either endogenous or exogenous energy substrates. As could be expected, the  $O_2$  uptake values varied a great deal from experiment to experiment and from tissue to tissue, but most values grouped around a median which was in the neighborhood of 2-3  $\mu$ moles  $O_2$  per hour per gram of tissue, regardless of the substrate. We believe that this great dispersion in values is due to factors that could not be controlled, such as the type of tumor available, the degree of undifferentiation and the time between the surgical excision and the beginning of the experiment. These conditions were foreseen and accepted as inherent to the study of freshly obtained human tumors, since they reflect the biological reality. Besides, the study was designed precisely with the end of ascertaining if there was a general pattern of respiration in human tumors, and not in a particular one.

When all tumors, regardless as to whether they were malignant or benign, were grouped together, we found that the median  $O_2$  uptake was 3.5  $\mu$ moles in peritumoral and 3.6  $\mu$ moles in tumoral tissues respiring with endogenous substrates. The range of uptake was similar in both tissues with values as low as 0.1  $\mu$ moles and as high as 19  $\mu$ moles for the first hour. This clearly shows that all human tumors studied are just as capable of oxygen utilization as presumably normal ones. The median  $O_2$  uptake of peritumoral tissues was a little lower with glucose (3.0  $\mu$ moles), but remained the same with

glutamine (3.4  $\mu$ moles) in relation to the values found with endogenous substrates. However, the median values for the tumoral tissues showed a tendency to lower values: 2.8  $\mu$ moles with glucose and 2.1  $\mu$ moles with glutamine. While the Mann-Whitney test shows that the values are not significantly different, the tendency seems interesting. However, when we separated the values obtained with malignant tumors from those found with leiomyomas, the tendency was not maintained. In this case, there were no differences between tumoral and peritumoral tissues in the absence or in the presence of glucose and the median  $O_2$  uptake values remained around 3  $\mu$ moles, except in the case of the benign tumors with glucose in which both normal and tumoral tissues showed lower medians, which, nevertheless, were not statistically different.

When we considered only mammary tumors we found no differences from what was found with all tumors. We were a little surprised, however, to find the same dispersion in values, since we expected that with a single type of tumor the results would more homogeneous. Even though we do not find an explanation for the fact, it could be possible that the dispersion is due, at least in part, to the nature of the tumor, ductal infiltrating, and to differences in the degree of dedifferentiation.

We also wanted to know whether the tissues would change the rate of  $O_2$  consumption if at the same time they had glucose and glutamine as substrates. We thought that if glycolysis and glutaminolysis were not independent, combination of the two substrates might somehow depress  $O_2$  uptake. This was not the case. In fact, if anything, the combination of substrates resulted in a median  $O_2$  uptake that was higher in the tumor, but, again, not significantly so. This is particularly striking when the results during 4 hours are observed. In fact, as pointed out above, a combination of glutamine and glucose maintained high rates of respiration during four hours incubation. Glutamine was able to maintain the rate to a lower extent, as was the case with glucose alone, but at much lower rates. This shows that some influence of one substrate over the other might actually exist in tumors. **Gonzalez-Mateos et al.** (1993), working with Ehrlich ascites tumor cells, showed that glutamine and asparagine decreased the glycolytic flux by about 80% and **Ahmed et al.** (1993) reported that glucose utilization was depressed by exogenous glutamine in human leukemic cell line HL60. These last authors showed, however, that glutamine utilization was enhanced by glucose. These findings could explain our results in the sense that even if glycolysis was depressed by glutamine, this would not be reflected in  $O_2$  uptake while glucose

might increase glutamine utilization over the long run maintaining high  $O_2$  uptake dependent of the aminoacid.

This interpretation might also be substantiated by our own results. In fact, we found that glucose uptake by tumoral tissues was depressed by coincubation with glutamine. We also found some enhancement in glutamine utilization caused by glucose. While the values are consistent with the findings of **Ahmed et al.** (1993), they were not statistically different. It should be pointed out that the concentration of the substrates used in all cases was that usually found in blood, i.e., 5 mM for glucose and 0.58 mM for glutamine. In this sense, the tissues had almost ten times more glucose than glutamine available. This difference is reflected in the amount of substrates taken up reported here. The uptake of glucose and glutamine could be affected by the activity of enzymes that are important in the initial step of glycolysis and glutaminolysis. In this respect, Newsholme's group (**Board et al.**, 1995) has shown that glucokinase of several tumor lines seems to be the rate-limiting step in glycolysis and that its inhibition by mannoheptulose, a substance that can be found in avocados, dramatically decreases tumor growth in experimental animals. On the other hand, **Rasschaert and Malaisse** (1995) have found that hexokinase is increased in tumoral islet cells.

The issue of whether or not glucose can actually be oxidized in the tricarboxylic acid cycle can not be settled by  $CO_2$  production alone, since  $CO_2$  is given off in the operation of oxidative hexose-monophosphate shunt. **Ahmed et al.** (1993) showed that the activities of glucose-6-phosphate dehydrogenase and 6-phosphogluconate dehydrogenase were lower in leukemic cell lines and that the oxidation of [ $1-^{14}C$ ] glucose was significantly lower than that of [ $6-^{14}C$ ] glucose. These observations imply that the activity of the oxidative branch of the hexose monophosphate shunt is depressed. This allows us to suggest that the  $C^{14}O_2$  that we found upon incubation of U- $C^{14}$ -glucose with tumoral tissues comes from oxidation of pyruvate derived from glucose. The same, of course, can not be said for the peritumoral tissue. In these conditions our results must be understood only in qualitative, rather than in quantitative terms, as far as glucose is concerned. The same does not apply to glutamine since all the  $CO_2$  obtained after incubation of both peritumoral and tumoral tissues with the amino acid comes from respiration related oxidation. With this in mind, we find that some pyruvate derived from glucose was oxidized to at least acetyl CoA. This is in line with **Portais et al.** (1993) finding that up to 57% of the Acetyl CoA found in C6 glioma cells is derived from glucose. We do not know whether or not this acetyl CoA is further oxidized in the

tricarboxylic acid cycle or if it is used in lipogenesis. In this sense, **Briscoe et al.** (1994), while demonstrating a high rate of lipogenesis in AS-30D hepatoma cells, suggest that the substrate for lipid synthesis is acetoacetate rather than pyruvate derived acetyl CoA.

The experiments in which [U-<sup>14</sup>C] glutamine was the substrate show no difference in CO<sub>2</sub> production between peritumoral and tumoral tissues. In this case, the glutamine label will appear only in CO<sub>2</sub> derived from the tricarboxylic acid cycle and there should be no difference in glutaminolysis in peritumoral and tumoral tissues, as found in this report. **Ahmed et al.** (1993) have observed that glutaminase activity was high in tumor cells, yet, the rate of uptake was low. On the other hand, **Souba** (1993) has compiled a lot of evidence that shows that many tumors are avid glutamine users and that *in vivo* they may act as a glutamine "trap" depleting the organism of this aminoacid. *In vivo* experiments reported by his group (**Chen et al.** 1993) showed that in an animal bearing a tumor, muscle glutamine was depleted because of an increased release to the blood, despite the fact that its synthesis was greatly augmented while the fibrosarcoma took practically all of the aminoacid up from circulation. Glutamine depletion increased with tumor growth. Our own experiments in which there is no difference in CO<sub>2</sub> production are not in contradiction with Souba's data, since **Ahmed et al.** (1993) data suggest that neither glucose nor glutamine contribute much to energy metabolism and their role might be more directed to nucleotide and protein synthesis in the tumor.

Our data also show that glutamine decreased the C<sup>14</sup>O<sub>2</sub> recovered from incubation of tumors with [U-<sup>14</sup>C] glucose, while glucose increased C<sup>14</sup>O<sub>2</sub> derived from [U-<sup>14</sup>C] glutamine. These results confirm the data reported on glutamine and glucose uptake, discussed above. **Ahmed et al.** (1993) suggest that the decreased glucose utilization in the presence of glutamine could be due to allosteric inhibition of phosphofructokinase. This is not likely since neither glutamine nor metabolites in its oxidative pathway affect phosphofructokinase directly. On the other hand, **Gonzalez-Mateos et al.** (1993) showed that the activity of the enzyme in the presence of effectors concentrations found in Ehrlich ascites tumor cells is sufficient to explain the low activity of the enzyme. The nucleotide effectors concentration would, of course, be due to glutamine oxidation.

Our experiments show that human tumors respire actively using endogenous substrates or glucose or

glutamine. In this activity they do not differ from apparently normal tissues. They also show that glucose may be oxidized to CO<sub>2</sub>, while a significant proportion is converted to lactate (results not shown). Our experiments do not provide any clues as to why there seems to be a separation between glycolysis and tricarboxylic acid cycle oxidation of pyruvate. In this respect it is interesting to note that there are reports that the malate shuttle of reduced equivalents seems to be inoperative in tumors *in vivo* (**Dietzen & Davis**, 1993) while the glycerol-phosphate shuttle might be inhibited (**Halder et al.**, 1993, **Rasschaert & Malisse**, 1995). The high lactate production of tumors may provide a comparative advantage *vis a vis* normal cells, since a decreased pH in the interstitial fluid might protect the cells against immune cells by altering the conformation of the recognition surface proteins. However, it is interesting to note that a low pH may also destroy the cancer cells, a feature that has found some therapeutic use (**Harguindey**, 1982). Regardless of its possible activity, there is a larger lactate production than in normal cells. Preliminary experiments from our laboratory have shown that this may be due to a non-controlled phosphofructokinase in some human tumors.

## Bibliography

- Ahmed, N., Williams, JF & MJ. Weidemann.** 1993. Glycolytic, Glutaminolytic and Pentose-phosphate Pathways in Promyelocytic HL60 and DMSO-differentiated HL60 Cells. *Biochem.Mol.Biol.Int.* **29**:1055-1067
- Board, M., Humm, S. & E.A. Newsholme.** 1990. Maximum Activities of Key Enzymes of Glycolysis, Glutaminolysis, Pentose Phosphate and Tricarboxylic Acid Cycle in Normal, Neoplastic and Suppressed Cells. *Biochem. J.* **265**:503-509
- \_\_\_\_\_, **Colquhoun, A. & E.A. Newsholme.** 1995. High Km Glucose Phosphorylating (glucokinase) Activities in a Range of Tumor Cell Lines and Inhibition of Rates of Tumor Growth by the Specific Enzyme Inhibitor Mannoheptulose *Cancer Res.* **55**:3278-3285
- Briscoe, D.A., Fiskum, G., Holleran, A.L. & J.K. Kelleher.** 1994. Acetoacetate Metabolism in AS-30D Hepatoma Cells. *Mol.Cell.Biochem.* **136**:131-137
- Chen, M.K., Espat, N.J., Bland, K.I., Copeland, E.M. & W.W. Souba.** 1993. Influence of Progressive Tumor Growth on Glutamine Metabolism in Skeletal Muscle and Kidney. *Ann.Surg.* **217**: 655-666
- Dietzen, D.J. & E.J. Davis.** 1993. Oxidation of Pyruvate, Malate, Citrate and Cytosolic Reducing Equivalents by AS-30D Hepatoma Mitochondria. *Arch.Biochem.Biophys.* **305**:91-102
- Eskey, C.J., Koretsky, A.P., Domach, M.M. & R.K. Jain.** 1993. Role of Oxygen vs. Glucose in Energy Metabolism in Mammary Carcinoma perfused *ex vivo*: Direct Measurement by Phosphorous-31 NMR. *Proc.Natl.Acad.Sci.(USA).* **90**:2640-2650

- Gabai, V.L.** 1992. Glucose Decreases Respiratory Control Ratio in EL-4 Tumor Cells. *FEBS Letters*. **313**:126-128
- \_\_\_\_\_. 1993. Inhibition of Uncoupled Respiration in Tumor Cells: a Possible Role of Mitochondrial Calcium Efflux. *FEBS Letters*. **329**:67-71
- Gold, J.** 1974. Cancer Cachexia and Gluconeogenesis. *Ann.N.Y.Acad.Sci.*, **231**:103-110
- Goldman, R.D. Kaplan, N.O. & T.C. Hall.** 1964. Lactic Dehydrogenase in Human Neoplastic Tissues. *Cancer Res.* **24**:389-399
- Gonzalez-Mateos, F., Gomez, M.E., García-Salguero,L., Sanchez, V. & J.J. Aragon.** 1993. Inhibition of Glycolysis by Amino Acids in Ascites Tumor Cells. Specificity and Mechanism. *J.Biol.Chem.* **268**:7809-7817
- Halder, J., Ray, M. & S. Ray.** 1993. Inhibition of Glycolysis and Mitochondrial Respiration of Ehrlich Ascites Carcinoma Cells by Methylglyoxal. *Intnal. J.Cancer.* **54**:443-449
- Harguindey, S.** 1982. Hydrogen Ion Dynamics and Cancer: an Appraisal. *Med.Ped.Oncol.* **10**:217-236
- Koukl, J.F. Vorbeck, M.L. & A.P. Martin.** 1977. Mitochondrial three-dimensional form in ascites tumor cells during changes in respiration. *J.Ultrastruct.Res.* **61**:158-165
- Kovacevic, Z.** 1971. The Pathway of Glutamine and Glutamate Oxidation in isolated mitochondria from Mammalian Cells. *Biochem.J.* **125**:757-763
- \_\_\_\_\_. & **H.P. Morris.** 1972. The Role of Glutamine in the Oxidative Metabolism of Malignant Cells. *Cancer Res.* **32**:326-333
- Lazo, P.A.** 1981. Aminoacids and Glucose Utilization by Different Metabolic Pathways in Ascites Tumor Cells. *Eur.J.Biochem.* **117**:19-25
- \_\_\_\_\_. & **A. Sols.** 1980. Pyruvate Dehydrogenase complex of Ascites Tumor. Activation by AMP and other Properties of Potential Significance in Metabolic Regulation. *Biochem.J.* **190**:705-710
- McKeehan, W.L.** 1982. Glycoysis, Glutaminolysis and Cell Proliferation. *Cell.Biol.Int.Rep.* **6**:635-649
- Moreadith, R.W. & A.L. Lehninger.** 1984. The Pathways of Glutamate and Glutamine Oxidation by Tumor Cell Mitochondria. *J.Cell.Biol.* **259**:6215-6221
- Pedersen, P.L.** 1978. Tumor Mitochondria and the Bioenergetics of Cancer Cells. *Prog.Exp.Tumor Res.* **22**:190-274
- Portais, J.C., Schuster, R., Merle, M. & P. Canioni.** 1993. Metabolic Flux Determination in C& Glioma Cells Using Carbon-13 Distribution upon [1-<sup>13</sup>C]Glucose Incubation.
- Rasschaert, J. & W.J. Malaisse.** 1995. Activity of Cytosolic and Mitochondrial Enzymes Participating in Nutrient Catabolism of Normal and Tumoral Islet Cells. *Int. J. Biochem.Cell Biol.* **27**:195-200
- Reitzer, L.R., Wice, B.M. & D. Kennell.** 1979. Evidence that Glutamine, Not Sugar, is the Major Energy Source for Cultured HeLa Cells. *J.Biol.Chem.* **254**:2669-2676
- Souba, W.W.** 1993. Glutamine and Cancer. *Ann. Surg.* **218**:715-728
- Umbreit, W.W., Burris, R.H. & J.F. Stauffer.** 1957. Manometric Techniques. Burgess Publishing Co. Minneapolis, U.S.A.
- Villalobos, A. & A. Lehninger.** 1979. The Proton stoichiometry of electron transport in Ehrlich Ascites Tumor Mitochondria. *J.Biol.Chem.* **254**:4352-4358
- Warburg, O.** 1930. *The Metabolism of Tumors* (Translated by Frank Dickens). Constable and Co. London
- \_\_\_\_\_. 1956. On the origin of Cancer Cells. *Science* **123**: 309-314
- Weinhouse, S.** 1955. Oxidative Metabolism of Neoplastic Tissues. *Adv. Cancer Res.* **3**:269-325
- Weber, G.** 1977. Enzymology of Cancer Cells. *N.Eng.J.Med.* **296**: (first of two parts) 486-493; (Second of two parts) 541-551
- \_\_\_\_\_. , **Stubbs, M. & H.P. Morris.** 1971. Metabolism of Hepatomas of Different Growth rates in situ during Ischemia. *Cancer Res.* **31**:2177-2183
- Wenner, C.E. & J.H. Mackner.** 1967. H<sup>+</sup> Changes associated with divalent cation uptake by mouse liver mitochondria. *J.Biol.Chem.*, **242**:5052-5058

# PTERIDOFITAS EPIFITAS DE LA FRANJA SUBANDINA DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA, COLOMBIA <sup>1</sup>

por

Eduardo Barrera Torres<sup>2</sup>, Angela Chaparro de Barrera<sup>2</sup>  
María Teresa Murillo<sup>3</sup>

## Resumen

**Barrera Torres, E., Chaparro de Barrera, A. & M. T. Murillo.**: Pteridófitas epifitas de la franja subandina del departamento de Cundinamarca, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76) : 47-55, 1996. ISSN 0370-3908.

En 48 localidades, comprendidas entre 1000 y 2300 m alt., ubicadas en la franja subandina del departamento de Cundinamarca, se reconocieron 19 géneros y 62 especies, de Pteridofitos epífitos. El género *Polypodium* es predominante con 23 especies, que corresponden al 46 % de las registradas para Colombia. Los taxa reconocidos crecen sobre corteza o humus y se desarrollan como holoepífitas (HOE) o epífitas casuales (CAS) sobre hospederos poco específicos. El registro de la distribución geográfica y altitudinal de las especies demuestra mayor diversidad en la vertiente occidental de la cordillera oriental.

**Palabras claves:** Pteridófitas - epífitas - bosque subandino - distribución - diversidad.

## Abstract

Nineteen genera and sixty two species of epiphytes Pteridophytes were identified in forty eight localities in the lower montane forest of Cundinamarca, Colombia, between 1000 and 2300 m alt. The best represented genus is *Polypodium* with twenty three species. These species correspond to 46% of the species registered for Colombia. The individuals grow on the bark of trees or on the humus deposited on them, such as holoepiphytes (HOE) and casual epiphytes (CAS) with inespecific hosts. The altitudinal and geographical distribution show the highest diversity on the western slope of the eastern Andean mountains range.

**Key words:** Pteridophytes - epiphytes - lower montane forest - distribution - diversity.

<sup>1</sup> Investigación financiada por Colciencias y por la Universidad Nacional a través del Cindec.

<sup>2</sup> Departameno de Biología, Universidad Nacional de Colombia. Apartado 14490, Santafé de Bogotá, Colombia.

<sup>3</sup> Instituto de Ciencias Naturales-Museo Historia Natural, Universidad Nacional de Colombia. Apartado 7945, Santafé de Bogotá, Colombia.



## Introducción

Los bosques neotropicales nublados se caracterizan por una alta diversidad de epífitas vasculares (Madison, 1977), dentro de ellas, los helechos constituyen el segundo grupo más diverso después de las orquideas (Atwood, 1984) con aproximadamente 32 géneros y 838 especies (Gentry & Dodson, 1987); el grupo presenta notable endemismo (Lewis, 1971) y alta diversidad principalmente en altitudes medias como en Ecuador (Grubb *et al.*, 1963), Perú (Young, 1991) y Colombia (Sugden & Robin, 1979). Los bosques húmedos montanos propios de esta franja están desapareciendo a causa de la alta deforestación que alcanza una magnitud de 20 Ha por minuto (Le Bastille & Pool, 1978 citado por Catling & Lefkovich, 1989).

Los helechos, al igual que otras epífitas, se desarrollan básicamente sobre dos clases de sustrato: directamente sobre las sinuosidades de la corteza del hospedero ó sobre un colchón más o menos grueso de humus, musgo ó líquenes acumulados en los hospederos (Went, 1940 en Johansson, 1974). Este grupo constituye un objeto interesante de estudio debido a adaptaciones como tamaño reducido de las diásporas, alta capacidad de rebrote y tendencia a la poikilohidria, características propias de la condición epífita (Benzing, 1987).

La alta diversidad de epífitas vasculares se apoya en la diversificación de nichos existentes, donde las especies han coevolucionado competitivamente. Cada especie posee mecanismos especializados para aprovechar los recursos limitados del medio y diversas formas de regeneración (Ashron, 1969 citado por Zimmerman & Olmsted, 1992). Esta hipótesis plantea la posibilidad de que algunos epífitos prefieran ciertos hospederos (Ter Steege & Cornelissen, 1989).

Las condiciones climáticas de los bosques montanos como alta precipitación, cortos períodos de sequía y presencia permanente de neblina, favorecen el desarrollo de comunidades epífitas principalmente por el suministro de nutrientes transportados mediante el polvo, la lluvia ó la neblina (Nadkarni, 1986); sin embargo su distribución vertical y horizontal dentro del bosque depende de la tolerancia a la luz, a la humedad y de su preferencia por un determinado sustrato (Bogh, 1992).

En Colombia, la franja altitudinal entre 1000 y 2400 m alt., corresponde al bosque subandino de acuerdo con la clasificación de Cuatrecasas, (1989) y con el piso térmico medio (IGAC 1986). Aquí se ubica la mayor parte de la zona cafetera del país; la región soporta una de las

mayores influencias antrópicas, condición que amerita el conocimiento básico de sus recursos florísticos con miras a desarrollar un plan de conservación y aprovechamiento racional, en particular, de este grupo de plantas de importancia ecológica, científica y paisajista.

Este trabajo hace parte del proyecto de investigación "Epífitas vasculares del bosque subandino de Cundinamarca", en él se reconocen los taxa de Pteridofitos colectados, se establece su distribución en un gradiente altitudinal y se analiza la riqueza de especies.

## Metodología

Durante los años 1993-1994 se llevaron a cabo observaciones minuciosas y colecciones (aproximadamente 200 ejemplares) de helechos epífitos y afines, en jurisdicción de 48 municipios del departamento de Cundinamarca, ubicados en la franja subandina (Fig. 1).

La identificación de los ejemplares botánicos se hizo con ayuda de claves, material de referencia y bibliografía especializada (Evans, 1969; Mickel, 1981; Murillo & Harker, 1990; Ortega, 1991; Smith, 1981, 1983; Stolze, 1981, 1986 y Vareschi, 1968). Los ejemplares se depositaron en el Herbario Nacional Colombiano (COL).

Los helechos epífitos se agruparon de acuerdo con el sistema propuesto por Schimper, (1988) y Richards (1964) en:

**Holoepífitas o verdaderos epífitas (HOE):** especies que desarrollan todo su ciclo vital sobre un hospedero sin arraigarse en el suelo.

**Hemiepífitas primarias:** Principian su ciclo vital como epífitas y eventualmente emiten raíces que alcanzan el suelo y lo penetran.

**Hemiepífitas secundarias:** Principian su ciclo vital como terrestres, luego pierden su conexión con el suelo y se convierten en epífitas.

**Epífitas casuales (CAS):** Cuando algunos individuos funcionan como epífitos verdaderos, mientras otros son terrestres.

Para cada especie se determinó el tipo de sustrato en el sitio de colección: corteza o humus de acuerdo con la agrupación establecida por Went, (1940) citado en Johansson, (1974), quien señala que las epífitas se dividen en dos grupos de acuerdo a la demanda de sustrato; unas crecen sobre *corteza* con ninguna o escasa acumulación de humus y otras sobre *humus* acumulado en gran-

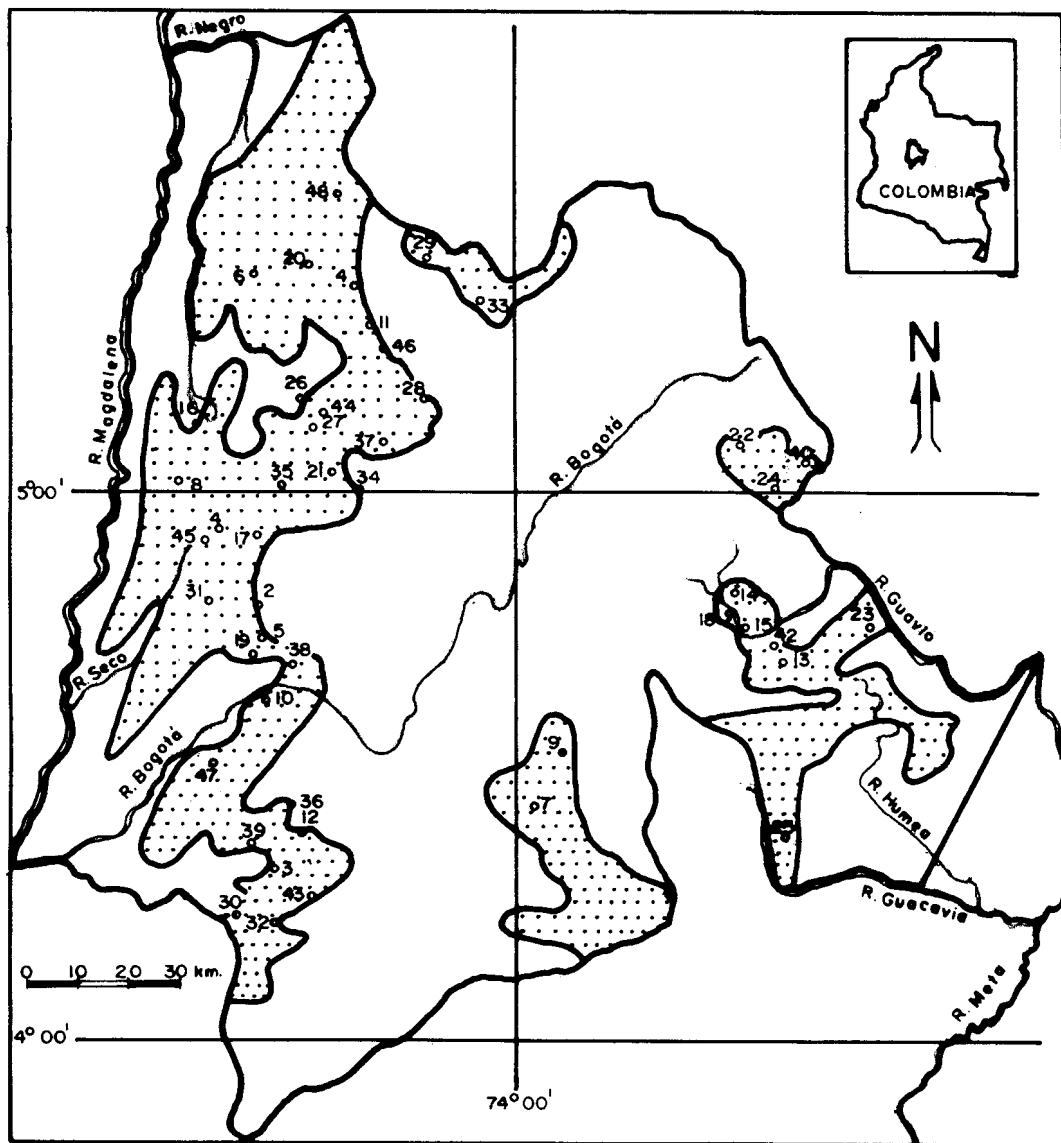


Figura 1. Departamento de Cundinamarca, Colombia. (La zona punteada señala las regiones que fueron muestreadas durante esta investigación).

#### AREA DE ESTUDIO - LOCALIDADES DE MUESTREO

- |                |                        |                   |
|----------------|------------------------|-------------------|
| 1. Aibán       | 17. Guayabal           | 33. San Cayetano  |
| 2. Anolaima    | 18. Gachetá-Junin      | 34. San Francisco |
| 3. Arbeláez    | 19. La Mesa            | 35. Sasaima       |
| 4. Bituima     | 20. La Palma           | 36. Silvania      |
| 5. Cachipay    | 21. La Vega            | 37. Supatá        |
| 6. Caparrapí   | 22. Machetá            | 38. Tena          |
| 7. Cáqueza     | 23. Mámbita            | 39. Tibacuy       |
| 8. Chaguani    | 24. Manta              | 40. Tibirita      |
| 9. Choachí     | 25. Medina (Santa Ana) | 41. Topaipí       |
| 10. El Colegio | 26. Nimaima            | 42. Ubalá         |
| 11. El Peñón   | 27. Nocaima            | 43. Venecia       |
| 12. Fusagasugá | 28. Pacho              | 44. Vergara       |
| 13. Gachalá    | 29. Paime              | 45. Vianí         |
| 14. Gachetá    | 30. Pandi-San Bernardo | 46. Villa Gómez   |
| 15. Gama       | 31. Quipile            | 47. Viotá         |
| 16. Guaduas    | 32. San Bernardo       | 48. Yacopí        |

des cantidades, donde además se desarrollan epífitas no vasculares.

Para cada uno de los flancos de la cordillera se estudió la distribución altitudinal de los helechos y afines y se registraron los forófitos u hospederos entre 1000 y 2300 m alt. a intervalos de 100 m.

Se calculó el porcentaje de epifitismo de los géneros encontrados, mediante confrontación con las especies registradas para Colombia por Murillo & Harker (1990).

### Area de estudio

El departamento de Cundinamarca tiene una extensión aproximada de 24.000 km<sup>2</sup>, de los cuales un 22% corresponde al piso térmico medio (IGAC, 1986), ubicado en las laderas de la cordillera oriental, en sus dos flancos: occidental hacia el valle del río Magdalena y oriental hacia la cuenca del río Meta en los llanos orientales. Los puntos extremos se localizan entre las coordenadas 3° 42' y 5° 51' de latitud norte y entre 73° 03' y 74° 54' de longitud al oeste de Greenwich (IGAC, 1971).

El piso térmico medio comprende la zona cafetera que hacia el occidente del departamento se presenta en forma continua y se extiende de sur a norte con una mayor amplitud hacia el centro y noroccidente; hacia el oriente del departamento se presenta fragmentado (Fig. 1). Los factores orográficos y la influencia de vientos húmedos provenientes del valle del Magdalena y de la llanura oriental favorecen la formación temporal de neblina hacia ambos flancos de la cordillera.

Las formaciones vegetales predominantes, reconocidas de acuerdo con el sistema de Holdridge (Espinal & Montenegro, 1977), corresponden a bosque húmedo y muy húmedo premontano hasta bosque húmedo y muy húmedo montano bajo. La cobertura vegetal aparece entonces como un mosaico de diferentes unidades vegetales; la vegetación natural se encuentra altamente intervenida por los innumerables asentamientos humanos acompañados del cultivo del café y frutales y por el establecimiento de potreros.

### Resultados

#### Características de la Pteridoflora epífita.

Se registraron 19 géneros y 62 especies epífitas en el bosque subandino de Cundinamarca (Tabla 1). El género *Polypodium* cuenta con el mayor número de especies (23),

le siguen *Asplenium* (6), *Campyloneurum* y *Huperzia* (con 4 especies cada uno). De los 62 taxa reconocidos, el 52% (32 especies) crecen sobre un colchón conformado por materia orgánica (humus) y asociaciones de epífitas vasculares y no vasculares y 30 especies que equivalen al 48%, germinan y crecen directamente sobre las fisuras de la corteza del hospedero (Tabla 1).

Algunos helechos crecen como epífitas accidentales o casuales (CAS): *Blechnum occidentale*, *Doryopteris pedata* var. *palmata*, *Thelypteris* spp, *Selaginella* spp y *Asplenium formosum*, el resto son holoepífitos (HOE) y se desarrollan sobre diferentes especies de árboles hospederos.

Los hospederos que soportan mayor número de especies epífitas son generalmente árboles de corteza rugosa muy fisurada y gruesa, densamente ramificados, especialmente aquellos donde los ángulos de inserción son agudos o rectos. Se destacan los guamos (*Inga* spp), cedros (*Cedrela odorata*), carbonero o quebrajacho (*Calliandra pittieri*), cauchos (*Ficus* spp), naranjo y mandarino (*Citrus* spp), saman (*Pithecellobium saman*), pomarrosos (*Eugenia jambos*), cajeto o nacedero (*Trichantera gigantea*). Así mismo es notable el epifitismo sobre arbustos de café (*Coffea arabica*). Algunas especies que suelen renovar su corteza periódicamente, como los guayabos (*Psidium guajaba*) no soportan pteridófitas epífitas.

La confrontación de los resultados obtenidos con el número de especies totales de Colombia (epífitas, terrestres, rupícolas) según Murillo & Harker (1990), (Tabla 2), permite establecer que el mayor porcentaje de representación de cada género encontrado, respecto al total de especies presentes en Colombia, en orden descendente son: *Loxoscaphe*, *Pleopeltis*, *Solanopteris*, *Niphidium*, *Doryopteris*, *Polypodium*, *Dicranoglossum*, *Vittaria*, *Campyloneurum*, *Microgramma*, *Oleandra*, *Asplenium*, *Nephrolepis* y *Huperzia*.

En el presente trabajo no se observaron epífitos con marcada especificidad, pero si con alguna preferencia, como sucede con: *Dicranoglossum furcatum* sobre café (*Coffea arabica*), *Loxoscaphe theciferum* sobre tomatoquina (*Acnistus arborescens*), *Polypodium aureum* sobre cauchos (*Ficus* spp) y Samanes (*Pithecellobium saman*), *Asplenium praemorsum* sobre guamos (*Inga* spp) y café (*Coffea arabica*). Posiblemente esta tendencia reside en algunas características de los hospederos como rugosidad y grosor de la corteza y nivel de luz incidente, además es muy importante la composición de los sustratos donde se favorece la humedad por tiempo más prolongado, condiciones ideales para el anclaje de elementos de propagación sexual y asexual.

Tabla 1. Pteridófitos epífitos del bosque subandino de Cundinamarca. Características ecológicas y regionales de su distribución.

ESPECIE	Sustrato	RANGO ALTITUD.	CONDICION	FLANCO CORDILLER	Localidades (*)	No. Colección (**)
<i>Asplenium auritum</i> Sw.	H	984 - 1700	Holoepífito	Oc. y Or.	6,23, 25, 28,29,35,36,39,47	9,11,14,15,21,19,20
<i>Asplenium feei</i> Kunze ex Fee	H	1600	Holoepífito	Oc.	28	13
<i>Asplenium formosum</i> Willd.	H	1300	Casual	Oc.	10,47	27,28
<i>Asplenium juglandifolium</i> Lam.	H	1530	Holoepífito	Oc.	1,28,37	16,29,30
<i>Asplenium praemorsum</i> Sw.	H	2000	Holoepífito	Oc. y Or.	18,27,31,32,34,38,40,45	12,31,42,45,46
<i>Asplenium serra</i> Langsd & Fish.	H	1530 - 2000	Casual	Oc.	37,38,46	72,73,80,104
<i>Blechnum occidentale</i> L.	H	1545	Holoepífito	Oc.	46	86
<i>Campyloneurum aglaolepis</i> Alston (de la Sota)	H	1225	Holoepífito	Oc.	29	105
<i>Campyloneurum angustifolium</i> (Sw.) Fee	H	984 - 2130	Holoepífito	Oc. y Or.	2,6,25,28,34,35,38,39,43	32,33,88,89,91,92,93, 94,99,101,
<i>Campyloneurum phyllitidis</i> (L.) Presl	H	1640	Holoepífito	Oc.	3,4,5,27,32,36	95,96,102,103
<i>Campyloneurum</i> sp.	H	1000 - 1300	Holoepífito	Oc. y Or.	22,24,33,46	106,107,108,154,160
<i>Dicranoglossum furcatum</i> (L.) J. Smith	C	1000 - 1300	Holoepífito	Oc. y Or.	6,25,29,47	97,110,161,184
<i>Doryopteris pedata</i> var. <i>palmata</i> (Willd.) Hicklen	H	1430	Casual	Oc.	30	98
<i>Elaphoglossum muscosum</i> (Sw.) Moore	H	2145 - 2250	Holoepífito	Oc.	46	162,163
<i>Elaphoglossum</i> aff. <i>obtusum</i> Mickel	H	1635	Holoepífito	Oc.	46	164,165
<i>Grammitis pilosissima</i> (Mart. & Gal.) Morton	C	2260	Holoepífito	Oc.	46	166
<i>Huperzia limifolia</i> (L.) Trevisan	C	984 - 1400	Holoepífito	Oc. y Or.	23,42,46	22,43,67
<i>Huperzia</i> sp. (1)	C	1630 - 2090	Holoepífito	Oc.	33,46	109,193
<i>Huperzia</i> sp. (2)	C	1300 - 1700	Holoepífito	Or.	13,14	111,112
<i>Huperzia</i> sp. (3)	C	1465 - 1550	Holoepífito	Oc.	26,29	168,183
<i>Loxoscape theciferum</i> (H.B.K.) Moore	C	1370	Holoepífito	Oc. y Or.	8,9,11,13,21,26,48	8,114,120,145,149
<i>Microgramma lycopodioides</i> (L.) Copel	C	1000 - 1900	Holoepífito	Oc. y Or.	13,15,20,25,27,35,47	34,35,36,37,113,115,159,170
<i>Microgramma tecta</i> (Kaulf.) Alston	C	1000	Holoepífito	Or.	25	56
<i>Microgramma</i> sp.	C	1300 - 2200	Holoepífito	Oc.	46	169
<i>Nephrolepis coratfolia</i> (L.) Presl.	H	1285 - 2000	Holoepífito	Oc. y Or.	3,10,14,15,18,32,39,43	6,25,26,38,40,41,48,49
<i>Niphidium albopunctatissimum</i> Lellinger	H	1780	Holoepífito	Or.	42	100
<i>Niphidium crassifolium</i> (L.) Lellinger	H	1000 - 1780	Holoepífito	Oc. y Or.	3,16,25,26,42,43	117,118,140,172,179
<i>Oleandra lehmannii</i> Maxon	C	1530	Holoepífito	Oc.	46	152
<i>Pleopeltis astrolepis</i> (Liebm.) Fourn	C	1450 - 2000	Holoepífito	Oc.	19,36	57,58
<i>Pleopeltis macrocarpa</i> (Willd.) Kaulf	C	1450 - 2300	Holoepífito	Oc. y Or.	7,10,12,14,15,22,24,34	51,52,53,54,55,119,150,156,196,198
<i>Pleopeltis peruviana</i> (Cav.) Hook & Grew	C	1300 - 2145	Holoepífito	Oc. y Or.	7,13,16,22,34,41,43,45	4,62,63,64,65,131,157,194,201

\* Ver figura 1

\*\* Colección de Angela Chaparro

Or: Oriental

Oc: Occidental

H: Humus

C: Corteza

Tabla 1. Pteridófitos epífitos del bosque subandino de Cundinamarca. Características ecológicas y regionales de su distribución. (Continuación)

ESPECIE	Sustrato	RANGO ALTITUD.	CONDICION	FLANCO CORDILER..	Localidades (*)	No. Colección (**)
<i>Polypodium aureum</i> L.	H	1000 - 2000	Holoépfito	Oc. y Or.	1,7,16,22,23,28,42,44	71,82,121,146,197,202
<i>Polypodium bolivianum</i> Rosenst.	C	2000	Holoépfito	Oc.	33	195
<i>Polypodium bombycinum</i> Maxon	H	2145	Holoépfito	Oc.	28	192
<i>Polypodium constimile</i> Mett.	H	1000	Holoépfito	Or.	25	66,136
<i>Polypodium dasypleuron</i> Kunze	C	1300 - 2200	Holoépfito	Oc.	41	125
<i>Polypodium decumanum</i> Willd.	H	1000 - 1300	Holoépfito	Oc. y Or.	3,23,47,48	122,129,185,199
<i>Polypodium eurybasis</i> v. <i>glabrescens</i> (R) Evans	H	2100	Holoépfito	Oc.	19	87
<i>Polypodium fimbriatum</i> Maxon	H	1350	Holoépfito	Oc.	6	153
<i>Polypodium fraxinifolium</i> Jacq.	H	2000	Holoépfito	Oc.	37	151
<i>Polypodium funcikii</i> Mett.	C	2200	Holoépfito	Or.	18	81
<i>Polypodium guttatum</i> Maxon	C	1500 - 1900	Holoépfito	Oc.	2,28,39	3,75,76
<i>Polypodium hygrometricum</i> Splitg.	C	1350 - 2195	Holoépfito	Oc.	19,20,28	10,85,123,182
<i>Polypodium laevigatum</i> Cav.	C	1250 - 1350	Holoépfito	Oc.	20,29	124,130,133,187
<i>Polypodium leucostictum</i> Kunze	C	1500 - 1900	Holoépfito	Oc.	28,39	177,189,200
<i>Polypodium maritimum</i> Hieron.	H	1300	Holoépfito	Oc.	8,41	17,186
<i>Polypodium murorum</i> Hook.	C	1700 - 2000	Holoépfito	Oc.	37	126
<i>Polypodium pectinatum</i> L.	C	1700	Holoépfito	Oc.	12	84,174
<i>Polypodium plumula</i> H. & B. ex Willd	C	1000 - 1600	Holoépfito	Oc.	6,23,25,28	127,175,188,191
<i>Polypodium polypodioides</i> (L.) Watt	C	1500	Holoépfito	Oc.	1,2	77,128,178
<i>Polypodium remotum</i> Desv.	H	1600 - 2240	Holoépfito	Or.	7,22,40	132,181,203
<i>Polypodium sessilifolium</i> Desv.	H	2230	Holoépfito	Oc.	46	180,190
<i>Polypodium thyssanolepis</i> Kl.	H	1600 - 2000	Holoépfito	Or.	13,15	134,171
<i>Polypodium triseriale</i> Sw.	H	1040 - 1600	Holoépfito	Oc. y Or.	6,12,13,21,25,28,39,44,48	68,70,74,137,138,141,142,158,172,173,176,180
<i>Polypodium</i> sp. (1)	H	1000	Casual	Oc. y Or.	6,25,48	24,67,40
<i>Polypodium</i> sp. (2)	H	1000	Casual	Oc. y Or.	8,25	143,144
<i>Solanopteris brunei</i> (Wreckle) Waagner	C	1200	Holoépfito	Oc.	48	38
<i>Thelypteris hispida</i> (Decne) Reed	H	2000	Casual	Oc.	19	23
<i>Thelypteris</i> sp.	C	1640	Casual	Oc.	41	170
<i>Vitaria graminifolia</i> Kaulf.	C	1000 - 1560	Holoépfito	Oc. y Or.	25,29,35	59,60,147,169,
<i>Vitaria lineata</i> (L.) Sm.	C	1000	Holoépfito	Oc. y Or.	16,23,25,43	45,61,148,158
<i>Vitaria stipitata</i> Kunze	C	1100	Holoépfito	Oc.	6,17	19,155

\* Ver figura 1

\*\* Colección de Angela Chaparro

Or: Oriental

Oc: Occidental

H: Humus

C: Corteza

Tabla 2. Géneros de pteridófitas registradas para Colombia comparadas con las epífitas encontradas en esta investigación.

GENEROS	NUMERO ESPECIES EN COLOMBIA (Murillo & Harker, 1990)	NUMERO ESPECIES EPIFITAS Bosque Subandino Cundinamarca	Porcentaje Relativo Epífitas
<i>Asplenium</i>	52	6	11.5
<i>Blechnum</i>	29	1	3.4
<i>Campyloneurum</i>	14	4	28.6
<i>Dicranoglossum</i>	3	1	33.3
<i>Doryopteris</i>	2	1	50.0
<i>Elaphoglossum</i>	97	2	2.1
<i>Grammitis</i>	46	1	2.2
<i>Huperzia</i>	38	4	10.5
<i>Loxoscaphe</i>	1	1	100.0
<i>Microgramma</i>	11	3	27.3
<i>Nephrolepis</i>	9	1	11.1
<i>Niphidium</i>	4	2	50.0
<i>Oleandra</i>	6	11	6.7
<i>Pleopeltis</i>	4	3	75.0
<i>Polypodium</i>	50	23	46.0
<i>Selaginella</i>	90	2	2.2
<i>Solanopteris</i>	2	1	50.0
<i>Thelypteris</i>	103	2	1.9
<i>Vittaria</i>	9	3	33.3

### Distribución geográfica y altitudinal

Se registraron 20 especies de helechos epífitos, comunes a las dos vertientes de la cordillera oriental. La vertiente occidental es más rica, con 54 especies, comparada contra 27 en la vertiente oriental (Tabla 1).

El mayor número de especies (23) se encontró en la vertiente occidental, en los niveles altitudinales 1300 y 1500 m alt. En la vertiente oriental, se observa un máximo de especies (16) a 1000 m alt. Hay disminución de especies por encima de 2000 m alt. (Fig. 2).

### Discusión

El conjunto de taxa resulta diverso y bien representado a nivel de géneros epífitos, si se tiene en cuenta que de aproximadamente 32 señalados para el Neotrópico (Gentry & Dodson, 1987), 19 se encuentran en la zona de estudio, cifra que corresponde al 69.4%.

Aunque el objetivo de esta investigación no fué determinar la ubicación precisa de las epífitas sobre los forófitos, se pudo detectar mayor concentración de ellas en el tronco y en las ramas bajas ó proximales, principalmente hacia horquetas. Los géneros *Blechnum*, *Selaginella*, *Grammitis*, *Elaphoglossum* y *Thelypteris* se encontraron preferencialmente concentrados hacia la base de los troncos ó también

creciendo como especies terrestres o rupícolas en parches bien definidos. De otra parte, las especies de *Huperzia* se observaron péndulas en las ramas medias y altas de árboles muy frondosos y su presencia restringida a microhábitats umbrófilos y particularmente húmedos, como las márgenes de ríos y quebradas dentro de los bosques de niebla. Las anteriores observaciones concuerdan con Brown (1990) y Bogh (1992) quienes atribuyen la presencia de determinadas epífitas a la disponibilidad de humedad y sombra en esos lugares.

El predominio del género *Polypodium* (s.s) concuerda con la afirmación de Stolze (1981), quien lo caracteriza como cosmopolita y representado por un número elevado de especies en América tropical, hecho que apoya la amplia distribución observada en el bosque subandino, tanto en las dos vertientes como en los diferentes niveles altitudinales.

El elevado número de especies de este género corresponde también a la cantidad de especies registradas para Colombia (Murillo & Harker, 1990) que constituyen cerca del 50% de las especies en el mundo y puede estar relacionada con la versatilidad de formas de crecimiento del rizoma: trepador y rastrero, de consistencia herbácea o leñosa (Stolze, 1981), con desarrollo asociado a musgos, líquenes y otros pteridófitos.

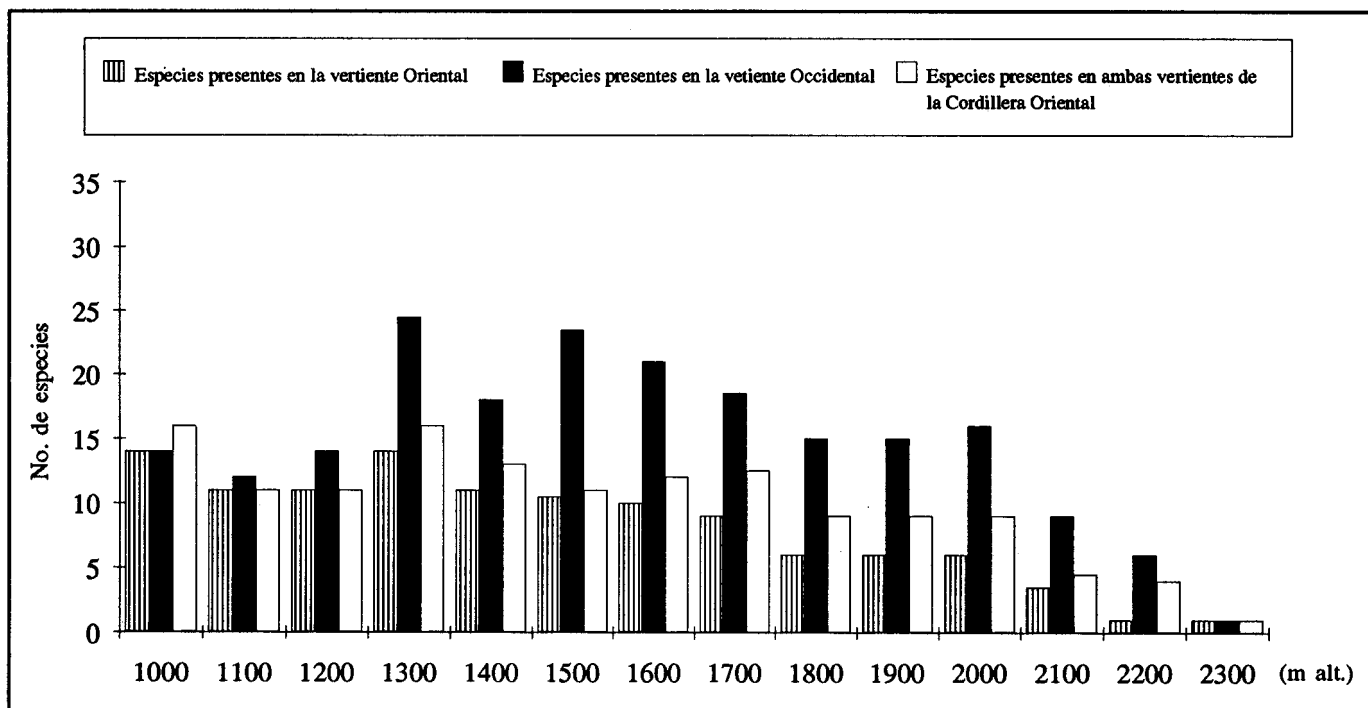


Figura 2. Distribución altitudinal de las especies de helechos epífitos y afines en la franja subandina del departamento de Cundinamarca

Algunas especies señaladas en el presente estudio han sido registradas como epífitas en la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), también en bosques de niebla y en altitudes similares (Sugden & Robins 1979).

En el presente trabajo se encontraron especies en condición de epifitismo casual pertenecientes a los géneros *Thelypteris*, *Blechnum*, *Doryopteris* y *Selaginella* que confirman la modalidad de habitat característico de estos géneros, principalmente terrestre como afirman varios autores, entre ellos Tryon & Tryon (1982). A nivel de especies, *Asplenium formosum*, corrobora el mismo hecho.

De acuerdo con las observaciones logradas en este estudio, se detecta preferencia de los helechos por crecer sobre un determinado sustrato y esta localización se relaciona con algunas características morfológicas. Así, las especies *Microgramma* spp, *Pleopeltis* spp, *Oleandra lehmannii*, *Solanopteris brunei* y algunas del género *Polypodium* como *P. funckii* y *P. laevigatum*, encontradas sobre corteza, poseen rizoma delgado, con entrenudos largos, de consistencia blanda, flexuosos, de orientación plagiótrópa y frondes esparcidas a lo largo del rizoma.

Las especies *Asplenium* spp, *Blechnum occidentale*, *Campyloneurum* spp, *Elaphoglossum* spp, *Nephrolepis cordifolia*, *Niphidium* spp y algunas especies del género *Polypodium* como *P. fimbriatum*, *P. aureum* y *P. decumanum*, entre otras, que prefieren el humus como sustrato, presentan rizoma grueso, con entrenudos cortos, de consistencia leñosa, rígidos, erectos y frondes dispuestas en roseta.

La distribución de los Pteridófitos en las dos vertientes de la cordillera oriental, muestra mayor riqueza de especies en la vertiente occidental, hecho que se relaciona también con la mayor extensión de la franja subandina y con el mayor número de localidades exploradas en las respectivas vertientes.

### Bibliografía

- Atwood, J. T. 1984. A floristic study of Volcan Mombacho Department of Grenada, Nicaragua. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 71:141-209.
- Benzing, D. H. 1987. Vascular epiphytism: taxonomic participation and adaptive diversity. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 74:183-204.
- Bogh, A. 1992. Composition and distribution of the vascular epiphyte flora of an Ecuadorian montane rain forest. *Selbyana* 13:25-34.

- Brown, A. D.** 1990. El epifitismo en las selvas montanas del parque "El Rey", Argentina: composición florística y patrón de distribución. *Rev. Biol. Trop.* **38**(2A):155-166.
- Catling, P.M. & L. P. Lefkovitch.** 1989. Association of vascular epiphytes in a Guatemalan cloud forest. *Biotropica* **21**:35-40.
- Cuatrecasas, J.** 1989. Aspectos de la vegetación natural en Colombia. *Perez Arbelaezia* **2**(8):155-283.
- Espinal, S. & Montenegro,** 1977. Formaciones Vegetales de Colombia. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. IGAC, XIII. Bogotá. 238 p.
- Evans, A. H.** 1969. Interspecific relationships in the *Polypodium pectinatum-plumula* complex. *Ann. Missouri Bot. Gard.* **55**(3):193-293.
- Gentry, A. H. & C. H. Dodson.** 1987. Diversity and Biogeography of Neotropical vascular epiphytes. *Ann. Missouri Bot. Gard.* **74**:205-233.
- Grubb, P. J., Lloyd, J. R., Pennington, T. D. & T. C. Whitmore.** 1963. A comparison of Montane and Lowland Rain Forest in Ecuador, I. The Forest structure, physiognomy, and floristic. *J. Ecol.* **51**: 657-601.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).** 1971. *Atlas Básico de Colombia*, pp. 132-137.
- . 1986. Diccionario geográfico de Colombia. Tomos I y II. Ed. Andes. Bogotá. pp. 400-401, 787.
- Johansson, D.** 1974. Ecology of vascular epiphytes in West African rain forest. *Acta Phytogeographica Suecica* **59**:1-131.
- Lewis, W. H.** 1971. High floristic endemism in low cloud forests of Panama. *Biotropica* **31**(1):78-80.
- Madison, M.** 1977. Vascular epiphytes: their systematic occurrence and salient features. *Selbyana* **2**:1-13.
- Mickel, J. T.** 1981. Ferns and fern allies of Guatemala. Part II. Polypodiaceae. The genus *Elaphoglossum*. *Fieldiana Botany, New Series* No. **6**:210-238.
- Murillo, M. T. & M. A. Harker.** 1990. Helechos y plantas afines de Colombia. Academia Colombiana de Ciencias. Colección Jorge Alvarez Lleras No. 2. Ed. Guadalupe. Bogotá. 319 p.
- Nadkarni, N.** 1986. An ecological overview and checklist of vascular epiphytes in the Monteverde Cloud Forest Reserve, Costa Rica. *Brenesia* **24**:55-62.
- Ortega, F.** 1991. Los Helechos. Biollania, Ed. especial No. 2. Talleres gráficos del Congreso de la República, Caracas, Venezuela. 155 p.
- Richards, P. W.** 1964. The tropical rain forest: An ecological study. Cambridge University Press.
- Schimper, A.F.W.** 1888. Die epiphytische vegetation amerikas. *Bot. Mitt. Tropen.* II G. Fisher Jena.
- Smith, A.** 1981. Ferns and fern allies of Guatemala. Part II. Polypodiaceae. The genus *Thelypteris*. *Fieldiana Botany, New Series* No. **6**:473-514.
- . 1983. Polypodiaceae-Thelypteridoideae. *Flora de Ecuador.* **18**:1-147. Publishing House of the Swedish Research Councils. Stockholm. Sweden.
- Stolze, R. G.** 1981. Ferns and fern allies of Guatemala. Part II. Polypodiaceae. *Fieldiana Botany, New Series* **6**:1-120; 238-472.
- . 1986. Polypodiaceae-Asplenoideae. En *Flora of Ecuador.* **23**: 1-83. Harling Gunnar y Benkt Sparre. Stockholm.
- Sugden, A. M. & R. J. Robins.** 1979. Aspects of the ecology of vascular epiphytes in Colombian Cloud Forests I. The distribution of the epiphytic flora. *Biotropica* **11**(3):173-188.
- Ter Steege, H. & J. H. Cornelissen.** 1989. Distribution and ecology of vascular epiphytes in lowland rain forest of Guyana. *Biotropica* **21**:331-339.
- Tryon, R. M. & A. T. Tryon.** 1982. Ferns and allied plants with special reference to tropical America. Ed. Springer-Verlag. New York. 857 p.
- Vareschi, V.** 1968. Helechos, Aspleniaceae-Salviniaceae. *Flora de Venezuela.* Vol I. Tomo II. Talleres Gráficos Universitarios. Mérida. Venezuela. 1033 p.
- Young, K. R.** 1991. Floristic diversity on the eastern slopes of the Peruvian Andes. *Candollea* **46**:125-143.
- Zimmerman, J. K & I. C. Olmstead.** 1992. Host Tree Utilization by vascular epiphytes in a seasonally forest (Tintal) in México. *Biotropica* **24**(3):402-407.



# DESMIDIOFLORULA DE LOS LAGOS MARGINALES DEL RIO AMAZONAS EN COLOMBIA

por

Santiago R. Duque<sup>1</sup> y John Ch. Donato<sup>2</sup>

## Resumen

Duque, S.R. & J. Ch. Donato. Desmidoflórua de los lagos marginales del río Amazonas en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 57-61, 1996, ISSN 0370-3908.

Se registran por primera vez para la Amazonia colombiana nueve especies de desmicias de los géneros *Gonatozygon*, *Euastrum*, *Staurastrum* y *Staurodesmus*. Los taxa *Gonatozygon monotaenium* fo. *punctatum*, *Euastrum binale* var. *hians* y *E. gemmatum* var. *gemmatum* fo. *gemmatum* se citan por primera vez para Colombia.

**Palabras claves:** Taxonomía - desmicias - Colombia - Amazonia - América del Sur.

## Abstract

For the first time, nine desmids species from the Colombian Amazonian basin belonging to the genera *Gonatozygon*, *Euastrum*, *Staurastrum* and *Staurodesmus* are reported. The taxa *Gonatozygon monotaenium* fo. *punctatum*, *Euastrum binale* var. *hians* and *E. gemmatum* var. *gemmatum* fo. *gemmatum* are recorded for the first time from Colombia.

**Key words:** Taxonomy - desmids - Colombia - Amazonia - South America.

## Introducción

Los estudios taxonómicos de algas para la Amazonia colombiana son escasos (Duque, 1994). Se destacan las contribuciones sobre los grupos de las desmiciadas (Duque

& Donato, 1993, 1994, 1995a y b) y de los euglenoides (Duque, 1995). En el presente estudio se registran las especies de desmicias de los géneros *Gonatozygon*, *Euastrum*, *Staurastrum* y *Staurodesmus* encontradas en lagos de la orilla colombiana del río Amazonas.

## Materiales y Métodos

Las muestras analizadas pertenecen a diferentes lagos de la margen colombiana del río Amazonas. El mapa de ubicación de estos lagos se encuentra en Duque & Donato (1993, 1995a) y la metodología está referenciada

<sup>1</sup> Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. A. A. No. 215. Leticia, Amazonas - Colombia.

<sup>2</sup> Unidad de Ecología y Sistemática (UNESIS), Departamento de Biología, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Dirección actual: Doctorandus, Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona, Avinguda Diagonal, 645 08028 Barcelona, España.

en Duque & Donato (1994, 1995a). Para este trabajo se revisaron las siguientes muestras:

- 516; 1001. Lagos de Yahuaraca. Río Amazonas, Leticia, Colombia. Muestra de fitoplancton. 20-dic-1988.
- 0056; 1056. Lago interior de Isla Ronda. Río Amazonas, Leticia, Colombia. Muestra de ticoplancton. 12-jul-1991.
1033. Lago de Tarapoto, Río Loretoyacu, Puerto Nariño, Amazonas, Colombia. Muestra de fitoplancton. 25-dic-1988.
0057. Lagos de Yahuaraca, Río Amazonas, Leticia, Colombia. Muestra de fitoplancton. 12-07-91.

Los números 0056, 0057 son de la colección ficoteca amazónica de la Universidad Nacional de Colombia en Leticia y Herbario Nacional Colombiano (COL) en Santafé de Bogotá, Colombia. Los números 516, 1001, 1056 y 1033 son de la Unidad de Ecología y Sistemática (UNESIS) de la Universidad Javeriana en Santafé de Bogotá, Colombia.

Para la determinación taxonómica de los taxa de *Gonatozygon*, *Euastrum* y *Staurastrum* se utilizaron los trabajos de Prescott *et al.* (1972, 1977, 1982), respectivamente y para *Staurodesmus* a Teiling (1967).

## Resultados

*Gonatozygon aculeatum* Hastings var. *aculeatum*. Am. Month. Micr. Jour. 13: 29 fig. 1 1892.

Lugar de colecta: Lago interior de Isla Ronda (516) y lagos de Yahuaraca (1001).

Célula de 234 x 13.3 µm. Relación largo/ancho de 18 (Fig. 1a, 1b). Su distribución es cosmopolita. En Colombia ha sido registrada por Coesel (1985), Donato (1991) y Ramírez (1992).

*Gonatozygon monotaenium* de Bary fo. *punctatum* Croasdale. Trans. Am. Micr. Soc. 84(3): 304 pl 1, fig. 3 1965.

Lugar de colecta: Lago interior de Isla Ronda (0056, 1056).

Célula de 137 x 11.25 µm. Relación largo/ancho de 12.17 (Fig. 2). Se encuentra en Delaware y la isla Devon (USA). Primera cita para Colombia.

*Euastrum binale* (Turpin) Erh. ex Ralfs var. *hians* (W. West) W. Krieger. In Rabenhorst, Kryptogamen - FL. Deutschl. 13(1):551 pl 75 fig. 16 1937.

Lugar de colecta: Lago interior de Isla Ronda (516) y lagos de Yahuaraca (1001).

Célula de 16.2 x 14.4 µm. Lóbulo polar de 3.6 µm de ancho, istmo de 4.2 µm. Relación largo/ancho de 1.1 (Fig. 3). Distribución cosmopolita. Primera cita para Colombia.

*Euastrum gemmatum* (Brébisson) Ralfs var. *gemmatum* fo. *gemmatum*. Brit. Desm. p. 87 pl 14 fig. 4a - 4e 1848.

Lugar de colecta: lago de Tarapoto (1033).

Célula de 45 x 37.6 µm. Istmo de 9.5 µm. Lóbulo polar de 15.2 µm de ancho. Relación largo/ancho de 1.2 (Fig. 4). Presenta distribución cosmopolita. Es la primera cita para Colombia.

*Staurastrum gladiusum* Turner var. *gladiusum* fo. *gladiusum*. Jour. Roy. Microsc. Soc., II, 5(6):938 pl 16 fig. 21 1885.

Lugar de colecta: Lago interior de Isla Ronda (0056, 1056).

Célula de 44.2 x 48.5 µm. Istmo de 10 µm. Relación largo/ancho de 0.9. Procesos de 8 - 11 µm (Fig. 5). Presenta distribución cosmopolita. En Colombia es citada por Coesel (1985).

*Staurastrum muticum* (Brébisson) Ralfs var. *muticum* fo. *muticum*. Brit. Desm. p. 125 pl 21 fig.4; pl 34 fig. 13 1848.

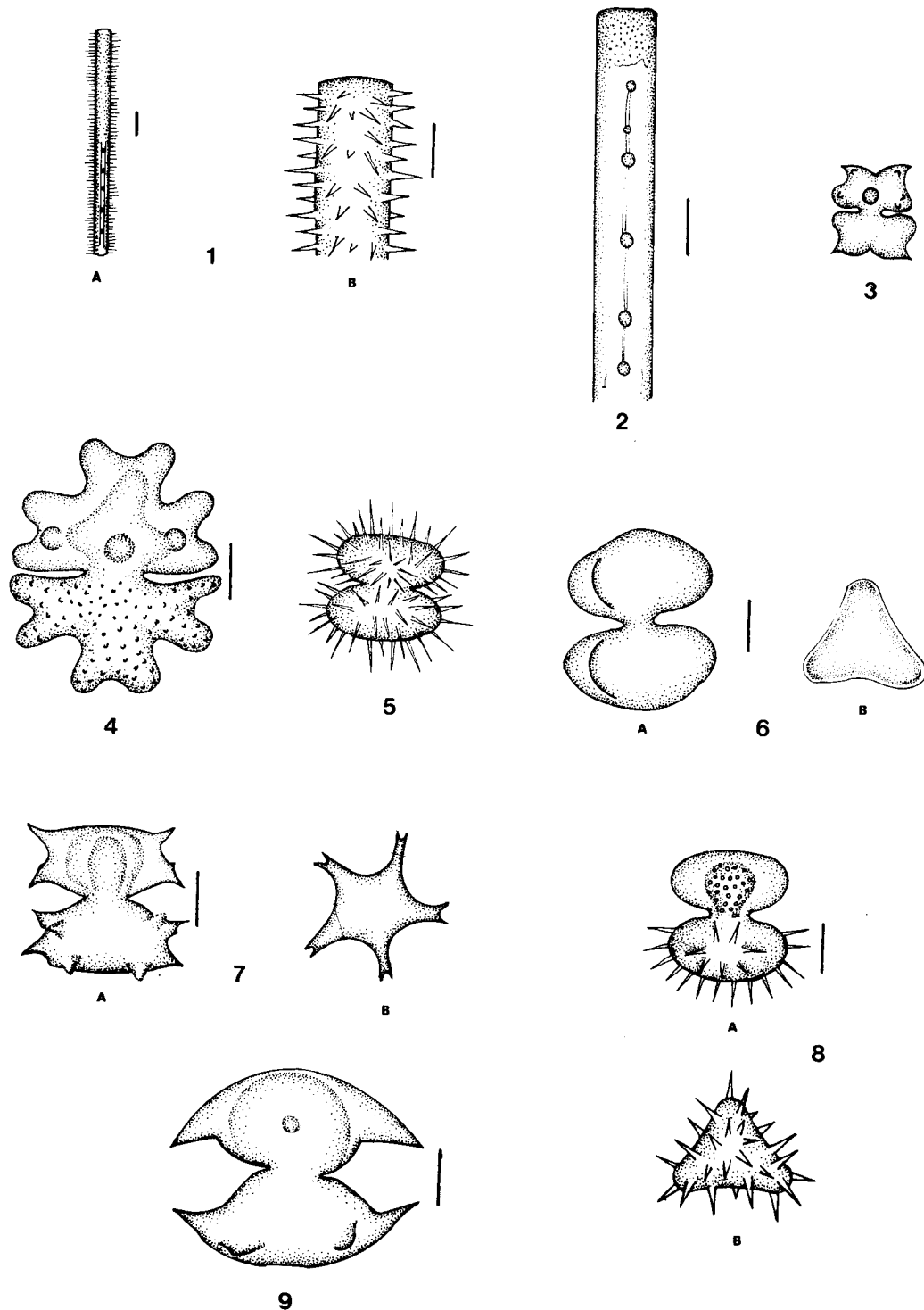
Lugar de colecta: Lago interior de Isla Ronda (0056, 1056).

Célula de 30 a 31.2 µm de largo y 26.5 a 27.6 µm de ancho. El istmo es de 7.2 - 8.3 µm. La relación largo/ancho de 1.09 - 1.17 (Fig. 6a, 6b). Tiene distribución cosmopolita. En Colombia es citada por West (1914) y Coesel (1985).

*Staurastrum quadrangulare* (Brébisson) Ralfs var. *quadrangulare*. Brit. Desm. p. 128 pl 22 fig. 7; pl 34 fig. 11 1848.

Lugar de colecta: Lago interior de Isla Ronda (0056, 1056).

Célula de 23.7 x 17.8 µm (sin procesos). Istmo de 8.1 µm. Relación largo/ancho de 1.33 (Fig. 7a, 7b). Presenta distribución cosmopolita. En Colombia es registrada por Coesel (1985) y Donato (1987).



**Figuras 1 a 9.** Especies de desmids registradas en este trabajo. 1. *Gonatozygon aculeatum* var. *aculeatum* a) Vista frontal; b)Detalle de las espinas. 2. *Gonatozygon monotaenium* fo. *punctatum*. 3. *Euastrum binale* var. *hians*. 4. *E. gemmatum* var. *gemmatum* fo. *gemmatum*. 5. *Staurastrum gladiusum* var. *gladiusum* fo. *gladiusum*. 6. *S. muticum* var. *muticum* fo. *muticum* a) Vista frontal, b) Vista apical. 7. *quadrangulare* var. *quadrangulare* a) Vista frontal, b) Vista apical. 8. *S. setigerum* var. *setigerum* fo. *setigerum* a) Vista frontal, b) Vista apical. 9. *Staurodesmus convergens* var. *convergens*. La figura 1a tiene una escala de 20  $\mu$ m. El resto de 10  $\mu$ m.

*Staurastrum setigerum* Cleve var. *setigerum* fo. *setigerum* Öfv. Kongl. Vet.-Akad. Förhandl. 10: 490 pl 4 fig. 4 1863

Lugar de colecta: Lagos de Yahuaraca (516, 1001).

Célula de 48.6 x 47.7 µm (sin procesos). Istmo de 17.1 µm. En vista apical de 39.7 de ancho. Relación largo/ancho de 1.01 (Fig. 8a, 8b). Tiene distribución cosmopolita. En Colombia es citada por **Björk & Gelin** (1980), **Donato** (1987) y **Ramírez** (1992).

*Staurodesmus convergens* (Ehr.) Teil. var. *convergens* Bot. Not. 1 p. 57 1948.

Lugar de colecta: Lagos de Yahuaraca (0057) y lago interior de Isla Ronda (0056, 1056).

Célula de 34.1 a 36.0 µm de largo y 25.5 a 30.5 µm de ancho. Istmo de 10.4 - 11.1 µm. Relación largo/ancho de 1.18 a 1.33. Ancho de los procesos de 43.2 µm (Fig. 9). Tiene distribución cosmopolita. En Colombia es citada por **Coesel** (1985) y **Donato** (1991).

#### Clave para la determinación de los taxa encontrados

1. Pared celular continúa, sin constricción media, en forma de saco ..... *Gonatozygon*
2. Pared celular punteada .....  
..... *Gonatozygon monotaenium*
- 2' Pared celular con espinas. ....  
..... *Gonatozygon aculeatum*
- 1' Pared celular dividida por una constricción media.
3. Hemicélulas sin brazos marcados.
4. Hemicélulas con lóbulos laterales profundos .....  
..... *Euastrum*
5. Hemicélulas poco lobuladas .....  
..... *Euastrum binale*
- 5' Hemicélulas multilobuladas .....  
..... *Euastrum gemmatum*
- 4' Hemicélulas sin lóbulos profundos .....  
..... *Staurodesmus convergens*
- 3' Hemicélulas con brazos marcados .....  
..... *Staurastrum*
6. Hemicélulas en vista apical, trirradiada.
7. Pared celular lisa ..... *Staurastrum muticum*

7' Pared celular con espinas. ....  
..... *Staurastrum setigerum*

6' Hemicélulas, en vista apical, pentaradiadas .....  
..... *Staurastrum quadrangulare*

#### Conclusiones

En este trabajo se citan nueve taxa de desmicias por primera vez para la Amazonia colombiana. *Gonatozygon monotaenium* fo. *monotaenium*, *Euastrum binale* var. *hians* y *E. gemmatum* var. *gemmatum* fo. *gemmatum* son las primeras citas para Colombia. El resto de los taxa fueron registrados para el país por **West** (1914), **Björk & Gelin** (1980), **Coesel** (1985), **Donato** (1987, 1991) y **Ramírez** (1992).

Cuatro trabajos previos sobre el grupo de desmicias existen para la región (**Duque & Donato**, 1993, 1994, 1995a, 1995b). Con esta entrega se elevan a 54 los primeros registros de desmicias en los lagos marginales del río Amazonas en Colombia, de los cuales 18 son primeras citas para el país (**Duque & Donato**, 1993, 1994, 1995a, 1995b).

#### Agradecimientos

Se reconoce el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia, del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables (INDERENA), del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (COLCIENCIAS) y de la Organización Internacional para las Migraciones (OIM). Los autores, asimismo agradecen al Dr. Carlos Bicudo por su ayuda en la revisión taxonómica y por habernos facilitado material bibliográfico. Los dibujos finales fueron elaborados por María Eugenia Morales.

#### Bibliografía

- Björk, S. & C. Gelin.** 1980. Limnological function and management of the Peñol reservoir, Colombia. Institute of Limnology of Lund, Sweden NBLI - 3038. 22p.
- Coesel, P. F. M.** 1985. Soortenlijst Desmidiaceen Colombia. (Unpublished).
- Donato, J. Ch.** 1987. Análisis limnológico y concentración de biocidas en peces de los ríos Ariari, Guayuriba, Humea y Meta. Rev. Fac. Cien. UNIV. JAV. 1(1): 29-52
- . 1991. Fitoplancton y aspectos físicos y químicos de la laguna de Chingaza en Cundinamarca, Colombia. *Caldasia* 16(79):489-500
- Duque, S. R.** 1994. Composición de la comunidad del fitoplancton en varios sistemas lénticos de la Amazonia colombiana. Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales. Santafé de Bogotá. 45p. Inédito.

- \_\_\_\_\_ 1995. Euglenofitas pigmentadas de la Amazonia colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **19** (75): 651-659.
- \_\_\_\_\_ & **J. Ch. Donato**, 1993. Primeros registros de *Micrasterias* (Desmidiaceae) en lagos del río Amazonas de Colombia. *Caldasia* **17**(2): 354-355
- \_\_\_\_\_ 1994. Primeros registros de *Closterium* (Desmidiaceae, Zygothyceae) en lagos de la orilla colombiana del río Amazonas. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **19**(73): 259-264
- \_\_\_\_\_ 1995a. Primeros registros de desmidias filamentosas (Zygothyceae) en lagos de la orilla colombiana del río Amazonas. *Bol. Ecotrop.* **29** (en prensa)
- \_\_\_\_\_ 1995b. Primeros registros de *Actinotaenium* y *Cosmarium* (Desmidiaceae) en lagos de la orilla colombiana del río Amazonas. Sometido a *Caldasia*.
- Prescott, G. W., Croasdale, H.T. & W. C. Vinyard**. 1972. Desmidales, 1: Saccodermatae, Mesotaeniaceae. In *North American Flora*, sér. 2, part 6. New York, The New York Botanical Garden. 84p.
- \_\_\_\_\_ 1977. A synopsis of North American Desmids. Desmidiaceae: Placodermatae. Lincoln, University of Nebraska Press. **2**(2): 413p.
- \_\_\_\_\_, **Bicudo, C. E. M. & W.C. Vinyard**. 1982. A synopsis of North American Desmids. Desmidiaceae: Placodermatae. Lincoln, University of Nebraska Press. **2**(4): 700p.
- Ramírez, J. J.** 1992. Contribución al estudio ecológico y taxonómico del fitoplancton de algunos cuerpos importantes para el sector eléctrico colombiano. Fondo FEN, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Inédito.
- Teiling, E.** 1967. The desmid genus *Stauroidesmus*: a taxonomic study. *Arkiv. för Botanik* **6**(11): 467-691
- West, G. S.** 1914. A contribution to our knowledge of the freshwater algae of Columbia. In **O. Furhmann & D. E. Mayor** (eds.). *Voyage d'exploration scientifique in Colombie*. Mem. Soc. Nat. Neuchatel **5**: 1013-1051.

# EL METODO DE CALDAS PARA MEDIR LA ELEVACION DE LAS MONTAÑAS

por

Jorge Arias de Greiff \*

## Resumen

**Arias de Greiff, J.** : El método de Caldas para medir la elevación de las montañas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76) : 63-69, 1996. ISSN 0370-3908.

Se presenta el método de Caldas para medir la elevación de los lugares por medio de la temperatura del agua hirviendo, como lo que es: un método, no usado antes, así se conociesen en Europa fórmulas, entre otras cosas, por las características especiales del régimen de presión atmosférica en esas latitudes y continentes.

En las condiciones particulares de la América tropical si fue posible formular el asunto como método. Se exponen otros logros posteriores, resultado del conocimiento que de esas condiciones particulares se tiene por estas tierras.

**Palabras claves:** Caldas - hipsometría.

## Abstract

The Caldas method to measure altitude through boiling water temperature is presented. It is a method which had not been used before, even if certain formulae were already known in Europe because, among other things, the conditions of atmospheric pressure are different in those latitudes.

In the particular conditions of tropical America it was possible to propose this as a method. Some additional successes resulting from our knowledge of these particular conditions are also discussed.

**Key words:** Caldas - hipsometry.

Sobre el método para medir la altura de las montañas ideado por Francisco José de Caldas y Tenorio es mucho lo que se ha escrito. Sin embargo aún pueden ser útiles algunos comentarios y aclaraciones adicionales.

Es conocido el relato de la rotura de un termómetro en una excursión a las cercanías de Popayán<sup>1</sup> y de cómo, considerando posible rehabilitarlo, decidió fabricarle una nueva escala de referencia elaborada a partir de los dos valores definidos, uno por la temperatura del hielo fundente y el otro por la temperatura de ebullición del agua. Al tratar

\* Observatorio Astronómico Nacional A.A. 2584 Bogotá D.C.

de hacer esto se dio cuenta que la temperatura de ebullición dependía de la presión atmosférica. Hizo el raciocinio siguiente: si la temperatura depende de esa presión y la altura de la columna es la medida de ella, entonces se puede prescindir del barómetro y, encontrada una relación entre la temperatura de ebullición y la altura de la columna barométrica, inferir el último dato del primero y aplicarlo a alguna de las fórmulas de nivelación barométrica que permiten encontrar la elevación de un lugar en función de la altura de esa columna. Para no perder de vista la claridad sobre el asunto que tenía don Francisco José, conviene hacer unas distinciones: Nivelación barométrica: es la determinación de la elevación de los lugares con respecto al nivel del mar o a otro lugar de comparación, usando las lecturas de la altura barométrica, debidamente corregidas de otras causas de variación como la temperatura, y aplicando estas alturas de la columna en una fórmula que las relacione con la elevación del lugar.

Nivelación termométrica: es la determinación de la elevación de un lugar por la temperatura ambiente del aire en el sitio, o también, la determinación de la elevación de un lugar por la temperatura de ebullición del agua en el sitio. Con una variante: una relación entre esa temperatura y la correspondiente altura de la columna barométrica permite continuar como nivelación barométrica.

Se le ocurrió a Caldas entonces que obviando así el uso del barómetro y reemplazándolo por la medida de la temperatura de ebullición del agua, se podría establecer un nuevo método para la determinación de la elevación de las montañas. Buscó en sus libros y nos dice Caldas que no encontró nada en ellos. No nos dijo qué era lo que buscaba: un método, la descripción detallada de los procedimientos, las normas establecidas, los consejos y recomendaciones para hallar esa elevación, o si buscaba simplemente fórmulas. Como sí encontró una fórmula, pensemos en que lo que buscaba, y no encontró, era un método. La fórmula, por lo demás, no le gustó: a ella se refirió desacreditándola.<sup>2</sup>

Esa famosa frase: “no está en mis libros”<sup>3</sup> ha sido muy usada por la beatería caldasiana para indicar la pobre situación en que se encontraba ese americano, sin darse cuenta con ello que no encontrar las cosas en los libros es una oportunidad para usar la cabeza, que no encontrar nada en los libros puede significar también que nada sabían de eso en Europa, o que si algo sabían, por razones locales de ese continente y esas latitudes, el asunto los tenía confundidos y los nativos de esas regiones, no habían podido sacar nada en claro. Por fortuna Caldas sólo encontró una fórmula en un libro, de lo contrario se hubiera enredado en el caos europeo de escalas termométricas, termómetros que se cierran cuando algún barómetro alcanza 27, 28, 29 ó 30 pulgadas en su columna de mercurio, pulgadas unas veces inglesas y otras francesas, a lo que se agrega una sarta de fórmulas que nunca sirvieron para nada: sus autores mismos dudaban de su validez, por lo tanto inútiles para establecer y normatizar un método. Suerte del americano en no haberse topado con ese caos. Tal caos se manifiesta en **Albis y Martínez** (1994).

Realizó Caldas otra excursión a la hacienda de la familia en Paispamba<sup>4</sup> e hizo observaciones de la altura de la columna en el barómetro y de la temperatura de ebullición de agua en varios lugares de los alrededores y en cerros elevados del vecindario; con esos datos y sus ideas claras sobre relación entre esas dos cantidades encontró un coeficiente que le permitía deducir la altura del barómetro del dato de temperatura, ello tomando como punto de comparación las medidas hechas en Popayán. Algo de esto había comunicado a su amigo Santiago Arroyo, radicado en Santafé; le instruyó en la toma de los datos, en verificar con granizo el estado del termómetro<sup>5</sup>, ya que Santafé no tiene hielo y Popayán sí. Pronto, cuando se supo la visita del barón de Humboldt a Santafé, le advirtió no dejar traslucir nada de sus ideas al prusiano pero sí que averiguara todo lo que el viajero supiera sobre el asunto<sup>6</sup>. Algo raro debió notar el barón: que en un lugar con tantos barómetros y termómetros, le preguntaran por medidas de temperatura de agua hirviente. De algo sospechó, pues en los manuscritos de

<sup>1</sup> En el primer párrafo del “Ensayo de una Memoria sobre un nuevo método de medir la altura de las montañas”, habla de esa excursión; en la nota No.3 a la publicación que del “Ensayo de una Memoria” le hizo el historiador Eduardo Posada, (Caldas, 1912), se indica que lo acompañaron Antonio Arboleda y Juan José Hurtado. En carta a Santiago Arroyo, del 5 de mayo de 1801, Caldas le indica que necesita “revolver mamotretos” en lo que se refiere al término superior de la escala termométrica, de donde se deduce que la excursión había tenido lugar poco antes.

<sup>2</sup> Refiriéndose a Sigaud de la Fond dice Caldas: “¿Quién al ver en Sigaud (sic) de la Fond un método incierto propuesto, y deseando este físico se perfeccionen y reiteren las experiencias de este género, no había de creer que había hecho un descubrimiento, atendiendo a la época en que escribe?”. (Caldas 1978, carta No. 44).

<sup>3</sup> En Obras de Caldas (Caldas, 1978)

<sup>4</sup> En carta a Santiago Arroyo, del 5 de agosto de 1801 (Caldas, 1978, Carta No. 40), le da cuenta Caldas del éxito de esa excursión, realizada en los últimos días del mes de julio.

<sup>5</sup> Ver las cartas 34,35,36 y 38 (Caldas, 1978).

<sup>6</sup> También en carta del 5 de julio (Caldas, 1978, Carta No. 38) le previene que se maneje con cautela y reserva. Teme que Miguel de Isla los penetre y descubra.

su diario de viaje de los días de permanencia en Santafé hay una nota titulada "Eau bouillante"<sup>7</sup> en la que plasma sus dudas sobre el asunto: que si la vasija debe ser de hierro o de barro, que si el cuello ancho o angosto, etc, con lo que demuestra que sobre el asunto las cosas no están claras, y no saber mayor cosa sobre ellas y no haberse preocupado por el temor. Por otro lado, el barón había tomado temperatura de ebullición del agua en un lugar previo del recorrido: Cumaná. En Santafé realizó esa experiencia varias veces, inclusive en Monserrate y Guadalupe. De ese lugar en adelante practica en varias localidades esa experiencia a lo largo del viaje: Contreras, Pueblo de Puracé, etc.. Algo sospechoso notó en Santafé.

Los amigos de Caldas en Popayán nada podían dejar traslucir de ese secreto, pues allí Caldas no había dicho mucho sobre su reciente descubrimiento, de modo que tampoco el barón se enteró allí de nada al respecto. Cuando llegó a Quito y en las primeras conversaciones Caldas le trató sobre la materia en forma abierta<sup>8</sup>, el barón fue sorprendido, y colocado fuera de base. El aturdido y molesto señor le dijo: que "Saussure imaginó medir las montañas por medio del termómetro sumergido en el agua hirviendo ¡bello principio! Hizo muchos experimentos sobre las montañas de Suiza y halló que 640 pies correspondían a un grado de Reaumur, siendo así que la ley de las densidades del aire es en progresión logarítmica o geométrica". Le dijo además que "se ha abandonado del todo el método de este físico por su inexactitud"<sup>9</sup>. Esta declaración equivocada sólo deja dos alternativas: o bien el Freiherr von Humboldt estaba desinformado, o estaba desinformando. Digamos por el momento que se trataba de lo primero, pero por el tono de autoridad, esas palabras fueron para Caldas una desinformación, que lo desilusionó. Menos mal que Humboldt se arrepintió de haber hecho eso con Caldas: ve luego sus papeles y le manifiesta: "Saussure no ha pensado como usted en agua hirviendo; sus trabajos se han limitado al temple de la atmósfera; asigna 640 pies de altura por un grado en el termómetro, y yo he observado en el Pico de Teide que da muy bien este coeficiente cuando el día es sereno y no se obra en lugares elevados"<sup>10</sup>. Con lo que el barón no deja duda de que lo había desinformado y, de intento,

pues lo que había realizado en las islas Canarias, y tenía que saberlo, no tenía nada que ver con el bello principio del termómetro sumergido en agua hirviendo. Ahora Caldas, atenuada la desinformación por esa aclaración se entusiasma; ve claro: lo que hacen en Europa es una cosa distinta a lo que él ha ideado. Humboldt con esa aclaración limitada, luego de buscar en sus libros, los de los europeos, pone de manifiesto que él y ellos saben casi menos que Caldas, y le da a Caldas el derecho, desde ese momento, a entrar en posesión de este su pequeño descubrimiento<sup>11</sup> y a asumir de inmediato una posición firme respecto al personaje y al asunto: "he dado un grado de perfección al método no conseguido en Europa". Caldas no supo que en Europa no es posible conseguir el mismo grado de exactitud o perfección que se logra en la América tropical. Acomete contra el método de Saussure y defiende con claridad y lógica el que él ha ideado<sup>12</sup>. Quien no tenía las ideas claras era el señor von Humboldt: "creyó que mi coeficiente tenía los mismos defectos que el de Saussure: pero meditando el caso, convino conmigo en esta propiedad de mi coeficiente, que lo distingue de todos"<sup>13</sup>. Al menos de los que conocían Caldas y Humboldt. Con la lección, Caldas asume la posición de "centro" y el señor barón pasa a la "periferia". El "misionero de la ciencia", que difunde la luz de la ciencia es Caldas, así sea la luz de una ciencia débil. Ahora comienza Humboldt a entender. A entender y a alejarse de ese americano que opacaba su fulgurante presencia de americanista para quien el americano es "objeto" de estudio pero no "sujeto" que le da lecciones. Ya se desquitará haciendo de esa fecha en adelante mínima referencia a él en sus diarios. Es cierto que Humboldt incluyó en sus obras el cuadro de temperaturas, lecturas barométricas y alturas de la columna calculadas por Caldas, que habían resultado del paseo a Paispamba, pero sin una indicación explícita de que "valores calculados por el señor Caldas con el coeficiente 0.974" fueron el resultado de un trabajo de Caldas, ni de cuál fundamento físico lo respalda, ni de para qué lo obtuvo, como si fuera cosa corriente su uso: deseo de ocultar lo que no le conviene es lo que allí se nota.

Y en cuanto a Caldas, esa confrontación abierta con Humboldt lo entusiasmó, le dio confianza en sus ideas, respaldadas por sus experiencias: "Yo había suscrito con el mayor gusto a una autoridad tan respetable. Si hubiera

<sup>7</sup> Humboldt, A von (1982) En las páginas 51 a y 73 a se encuentran notas alusivas a esas medidas.

<sup>8</sup> Caldas (1912) página 54.

<sup>9</sup> Caldas (1912), páginas 39 y 40.

<sup>10</sup> Caldas (1912) página 40.

<sup>11</sup> Caldas (1912) página 40.

<sup>12</sup> Caldas (1912) páginas 40 y 51.

<sup>13</sup> Caldas (1912) página 41.



autoridad contra la experiencia<sup>14</sup>," escribe Caldas motivado por la duda de Humboldt a creer en una temperatura fija de ebullición cuando la presión es la misma. Bien por el americano seguro de sí mismo y que no se deja confundir por el viajero. En su entusiasmo redacta una memoria titulada "Ensayo de una memoria titulada sobre un nuevo método para medir la altura de las montañas por medio del termómetro y el agua hirviendo<sup>15</sup>" de la que saca en limpio copias que envía a Antonio Arboleda, a José Ignacio de Pombo y a Mutis. En cuanto a la lección que le da a Humboldt, Caldas era la persona que en ese momento podía en el mundo darla. El era quien estaba en la frontera de ese conocimiento pues él había trabajado, el primero, esa realidad concreta de la América tropical, que permite esa perfección, así eso lo ignoraran en Europa y así Caldas ignorara que allá no tenían por qué saberlo. Esa frontera era débil y la incursión de Caldas apenas una escaramusa de validez local. A Humboldt por su parte se atribuye haber ya en esos días traspasado en América la frontera del conocimiento en otro sector de ese frente de batalla; haber descubierto las mareas atmosféricas, durante su permanencia en los llanos de Venezuela, de lo que naturalmente el sibilino barón no contó nada a Caldas. Sí le dijo de "la influencia de la luna sobre el barómetro, descubrimiento debido a Mutis"<sup>16</sup>, pero como Humboldt, descalificó el trabajo barométrico de Mutis en Santafé al anotar en su diario, —que Caldas leyó, pues en forma subrepticia y clandestina se lo mostraba Bonpland, su compañero de habitación—, que "el barómetro de Mutis es un termómetro de Ammotons"<sup>17</sup>, el asunto parece otro truco del barón. Y aquí aparece una particularidad del señor von Humboldt: Elogia sin límites a Mutis como botánico, en especial antes de la visita a Santafé; el desacrédito y burla vendrán cuando ya se encuentre lejos de Santafé. Lo elogia en algo en que Humboldt no tiene mucho que decir: botánica; para eso trajo un botánico a América, Bonpland, al que por demás olvida en su diario donde sólo lo menciona para poner de manifiesto cómo le estorban las demoras por debilidad o enfermedad del francés. A Mutis lo desacredita en algo en lo que el barón aspira a tener renombre: haber descubierto las mareas atmosféricas; debe entonces deshacerse de rivales, Mutis y Caldas, cuando hay de por medio opción creativa. Como Humboldt irá al lado de Bonpland en los descubrimientos

botánicos, e irá de primero (Humboldt, Bonpland, Kunth), le conviene opacar al segundo.

De Caldas hizo elogios en la Astronomía, campo en el que ninguno de los dos estaba haciendo nada creativo: ambos eran dos hábiles practicantes de métodos corrientes para determinar coordenadas geográficas de lugares, usando las posiciones de los astros; nada de rivalidad creativa y por consiguiente es posible el elogio, pero cuando lo encontró como rival creativo, en la física atmosférica y en la nivelación de las plantas, silencio, desinformación, referencia vaga y, en su momento, desinformación engañosa. Claro que mucho de esto está consignado en textos de Humboldt que no fueron revisados para ser publicados, pero por lo mismo muy dicentes en lo referente a su personalidad. Cuando Caldas, que sabía por carta recibida en un mismo correo que Mutis autorizaba el que lo acompañara en el resto de viaje, le preguntó si había recibido tal noticia, el barón le dijo: "no me dice nada el señor Mutis, no me ha escrito sobre el viaje de usted", otra vez desilusión de Caldas y otro arrepentimiento del prusiano por la mentira: "mi amigo, yo he mentado a usted: el señor Mutis me habla a la larga del asunto, pero yo, que he resuelto viejar solo, no quería dar a usted esa pesadumbre"<sup>18</sup> su determinación era no llevarlo como compañero. Cero y van dos. Enterrado Caldas de la influencia de la Luna en el barómetro, y para ese importante descubrimiento, resolvió iniciar un diario con medidas horarias de la presión atmosférica. Las que un día 10 de julio de 1802 hizo en Quito, las dejó consignadas en una carta<sup>19</sup>. Vio entonces que para perfeccionar su método, debía realizar aún mucho trabajo y, lo que no debe dejar de tenerse en cuenta, emplear en ello mucho tiempo, tratándose de un sólo observador en todo un virreinato, además ocupado en recogerle quinas al señor Mutis, sin opción de hacer registros continuos durante al menos un año en lugares diversos y conocer así el régimen de mareas atmosféricas en todo su territorio. Debía realizar observaciones a más bajas y a mayores elevaciones, cosa que tenía muy en claro: "¡Qué grado de perfección adquirirá esta teoría con observaciones sobre el Chimborazo!... Para darle la última mano es preciso ir al nivel del mar... Guayaquil, al pie, se puede decir, del inmenso Chimborazo"<sup>20</sup>. Pero entonces la relación ya no será lineal, o encontrará otra, esa sí, casi lineal, pero no ya entre temperatura de ebullición y altura

<sup>14</sup> Caldas (1912) página 41.

<sup>15</sup> A lo que ya se ha hecho referencia en las notas previas.

<sup>16</sup> Caldas (1912) página 56.

<sup>17</sup> Caldas (1978) Carta No. 60.

<sup>18</sup> Caldas (1978) Carta No. 63.

<sup>19</sup> Caldas (1978) Carta No. 69.

<sup>20</sup> Caldas (1912) página 54 y 55.

de la columna barométrica. Sus proyectos, motivaron que recomendara a Mutis suspendiera la remisión de la "memoria" a Cavanilles para hacerla pública<sup>21</sup>. Publicación que Caldas esperaba se hiciera antes del regreso de Humboldt a Europa. Había también cometido un error de observación: en Tagualó y Quimsacruz, sopló para quitar los vapores de agua hirviendo que rodeaban el termómetro. Los resultados de esas medidas le dieron diferencias entre las alturas barométricas leídas y las calculadas por la fórmula por lo que Caldas se desilusionó del asunto. Más tarde retomó el interés y realizó después varias operaciones de nivelación barométrica, una con observación simultánea de temperatura ambiente en Cartagena, y referida al nivel del mar<sup>22</sup>. En su informe al virrey prometió continuar en el asunto de su método<sup>23</sup>. En 1818, en forma póstuma, su memoria fue publicada en Europa, en Burdeos<sup>24</sup>. El interés en ese continente creció y muchas de las condiciones para una determinación más exacta de la temperatura de ebullición materializaron en el diseño de un aparato por Regnault, que él denominó hipsómetro, y también en los avances teóricos de la termodinámica. Así mismo se definieron las condiciones de observación: el agua debe ser químicamente pura. El vapor no debe tener vestigios de aire, así que no soplar para retirar esos vapores. En esas condiciones la tensión del vapor depende únicamente de la temperatura<sup>25</sup>. En la América tropical, donde la nivelación barométrica e hipsometría tienen opción, se realizaron trabajos para establecer el régimen de presión barométrica y preparar tablas que permitieran compensar las fluctuaciones debidas a las mareas atmosféricas. Trabajos notables en este sentido fueron realizados en Colombia por Boussingault, Tomás Herrán y Juan de Dios Carrasquilla; en Venezuela, por Hann, Ugueto y por el Dr. Eduardo Rohl, en el Observatorio de Cagigal de Caracas. Esos trabajos dieron por resultado la publicación por Eduardo Rohl de tablas de corrección a la lectura barométrica para cada hora del día y la noche y para cada uno de los meses del año<sup>26</sup>. En Colombia el ingeniero y

físico Darío Roza Martínez publicó unas tablas para el uso del barómetro y el hipsómetro, basados en una buena parte en el trabajo previo de Rohl. Por esos años también se realizaron en Puerto Rico observaciones que dieron lugar a tablas de corrección como las que se encuentran por ejemplo en el manual de Meteorología editado por Berry, Bolland y Beers en 1945; ellas registran la corrección con intervalos de 4 horas para cada una de las 4 "estaciones" del año, a las que están acostumbrados los autores de esos textos<sup>27</sup>. Muy recientemente, Jesús Antonio Eslava, ha publicado un trabajo denominado "Régimen en la presión barométrica en Colombia", muy útil para entender la viabilidad del método de Caldas (Eslava, 1995).

¿Qué es lo que les pasa entonces a los europeos?. Lo que les ocurre es que en las zonas templadas y en especial en la del hemisferio norte con sus grandes masas continentales y menores espacios oceánicos, los fenómenos ciclónicos atmosféricos cobran gran importancia. En ellos pueden presentarse diferencias de la presión del orden de 30 milibares entre el centro y los límites de esos meteoros, que recorren esas regiones con velocidad de mil a dos mil kilómetros por día, de modo que en un lugar dado esas fluctuaciones pueden ocurrir de un día para otro, en forma aleatoria pero previsible si no se despega la mirada del barómetro. En esas regiones ese aparato se usa para predecir la llegada del mal tiempo asociado con esos fenómenos, cuando la presión está bajando o en caso contrario, predecir la llegada del buen tiempo. Esos trastornos borran cualquier regularidad de las mareas atmosféricas y hacen tenerlas en cuenta para la nivelación barométrica. También esas variaciones aleatorias sirvieron para confundir sabios.

Retornemos ahora a Darío Roza Martínez. Este investigador, además de las tablas hipsométricas, presenta una fórmula y unas indicaciones que conforman un método para medir la altura de las montañas, con coeficiente constante de muy buena aproximación en un rango muy amplio de elevaciones. Resulta que a medida que se asciende, a iguales diferencias de la temperatura de ebullición van resultando diferencias de longitud de la columna barométrica cada vez menores y a diferencias constantes de presión atmosférica corresponden variaciones cada vez mayores de las diferencias de altura. En la primera relación el logaritmo de la presión es función del inverso de una temperatura; en la segunda la diferencia de presión es

<sup>21</sup> Había pensado que su "Memoria" se publique por separado o en los "Anales de Literatura" del Abate Cavanilles. (Caldas, 1912) página 51.

<sup>22</sup> (Caldas 1912) páginas 384 a 386

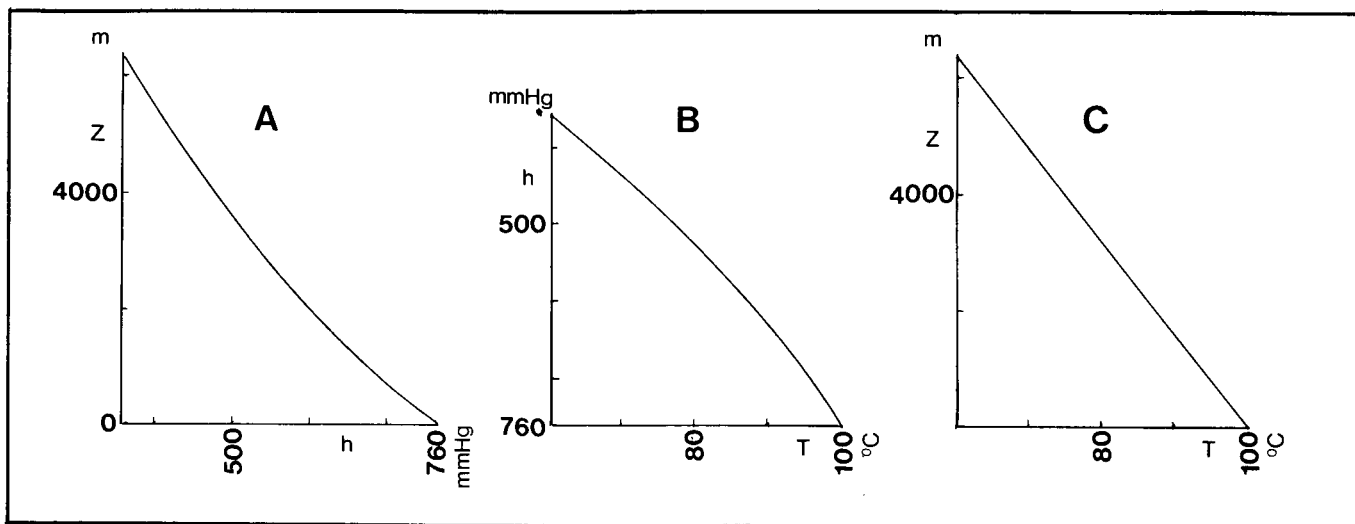
<sup>23</sup> Publicada por la imprenta de Lavallo Joven y Sobrino, Burdeos, 1919

<sup>24</sup> Caldas (1978) Carta No. 134

<sup>25</sup> Rohl, E. (1941), Nuevas Tablas Barométricas, Caracas. Allí se citan los trabajos de John y los de Ugueto.

<sup>26</sup> Roza, Darío y Aparicio, Tomás (1944): Tablas y Fórmulas para uso del Hipsómetro y para la Refracción Atmosférica. Bogotá 1944.

<sup>27</sup> Jenkins, G.R. (1945) "Diurnal Variation of the Meteorological Elements", en Handbook of Meteorology", Berry, F.A., Bolland, E., y Beers, N.R., editores, New York.



**A. La relación clásica entre la presión atmosférica y la elevación de un lugar**

**B. La relación entre temperatura de ebullición y altura de la columna de mercurio en el barómetro.**

El coeficiente hallado por Caldas que relaciona linealmente esas cantidades es una primera aproximación de alguna validez entre 1500 y 4000 metros de altura, basado en medidas tomadas en Popayán (1760 m) y en cerros vecinos a Paispamba (3300m). Error máximo del orden de 1,6 lneas; Caldas no se hubiera contentado con eso. El coeficiente de Caldas es la gradiente entre esa relación en la altura intermedia de 2770m. De todos modos Caldas necesitaba B1: Una representación de la Fórmula Antoine, con término de segundo grado que es:

$h = 1304.46 - 37.50 25T + 0.320572T^2$ , válida sólo entre 80 y 100°C. El error máximo es algo menor de 1mm de mercurio en la columna.

**C. La relación entre la temperatura de ebullición y elevación**

Es una relación cuasilineal que le permite a Darío Rozo proponer la siguiente fórmula:

C1:  $Z = 318,3 (100-T) + 10$ . Entre las 8 y las 11am, el término 10, se toma como 0; entre las 2 y las 6 pm se toma como 20. El error máximo entre 0 y 6400 m es de 3,2 m.

C2: Una representación basada en las tablas de Darío Rozo, válida para T entre 80° y 100°, con error mínimo de un metro, pero inválida fuera del rango, es:

$Z = 32106.87 - 324.1934T + 0,0324T^2$ . La manera atmosférica debe corregirse en la temperatura de ebullición (Tabla Y, Rozo & Aparicio, 1944).

función del logaritmo de las diferencias de elevación; la relación directa entre temperatura de ebullición y elevación de montañas evita los logaritmos y puede entonces representarse muy bien por una aproximación lineal. Pero es a esta relación a la que el señor Barón asigna dos coeficientes, uno para alturas de 0 a 1.000 metros y otro para alturas hasta 7.000 metros. Sus valores son 357 metros de elevación por grado centígrado para el primer caso y 304 para el segundo, números sin ningún valor. El que sirve es el de Darío Rozo 318.3. El método con coeficiente constante no era el de Caldas: es el de Darío Rozo, con una corrección de la marea atmosférica aplicada a la elevación obtenida. En sus tablas hipsométricas, donde el coeficiente no es constante, pero casi lo es, el doctor Rozo aplica la marea atmosférica como corrección que afecta la lectura del termómetro.

Espero que estas notas le permitan a Caldas sacudirse algo de los escombros que le cayeron encima durante el

bombardeo de historia internista de la ciencia europea, que le hicieron **Albis** y **Martínez** (1994).

**EPILOGO** - Ya pasó de moda el uso de tablas, hoy se construyen aproximaciones polinomiales, válidas para un amplio rango que representan las funciones con un mínimo error máximo, distribuido a lo largo del rango de validez, ello conseguido por las propiedades de los polinomios de Chebyshev. Para contribuir a la serie de fórmulas inútiles, he preparado dos: Para Caldas, una aproximación con término de segundo grado de las tensiones del vapor de agua y las temperaturas de esos vapores, basada en la fórmula Antoine<sup>28</sup>. Para mi profesor de Astronomía y Geodesia, ingeniero y físico Darío Rozo, otra, también con término de segundo grado, que liga

<sup>28</sup> Riddick, J. A., Bunger, W.B., (1970) "Organic Solvents", en Techniques of Chemistry, II, Weissberger, A., editor. Tercera edición, New York.

temperatura de esos vapores de ebullición y altura de los lugares. La última representa los valores de elevación de su tabla con error menor de 90 centímetros. La primera representa las alturas de la columna del barómetro con un error menor del milímetro de mercurio; en ambas el rango de alturas es el del virreinato de don Francisco José de Caldas: de Guayaquil al Chimborazo.

## Bibliografía

**Albis, V.S., & R. Martínez-Chavanz. 1994.** Las investigaciones Meteorológicas de Caldas, En : **Francisco José de Caldas**, Bogotá

**Caldas y Tenorio, F. J. 1912.** Obras de Caldas, recopiladas y publicadas por Eduardo Posada, Bogotá. Incluye : "Observaciones sobre la verdadera altura del Cerro de Guadalupe que domina esta ciudad, dirigidas a los editores del *Correo curioso*. "julio y agosto de 1801", páginas 1-11. "Ensayo de una Memoria sobre un nuevo método de medir la altura de las montañas por medio del termómetro y el agua hirviendo, seguida de un Apéndice", abril de 1802, páginas 25-47. "Memoria sobre el origen del sistema

de medir montañas y sobre el proyecto de una Expedición científica", abril de 1802, páginas 49-60. "Elevación del pavimento del salón principal del Observatorio de Santafé de Bogotá" páginas 383-386.

**Caldas y Tenorio, F. J. 1978.** "Cartas de Caldas", publicadas por la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Bogotá.

**Eslava, J. A. 1995.** Régimen de la presión atmosférica en Colombia. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Alvarez Lleras No. 8.

**Jenkis, G. R. 1945.** Diurnal Variation of the Meteorological Elements, en : "**Handbook of Meteorology**", New York.

**O' Connor, J.F. 1945.** Displacements of Pressure Systems en : "**Handbook of Meteorology**", New York

**Rohl, E. 1941.** Nuevas Tablas Barométricas preparadas especialmente para las Determinaciones Altimétricas en Venezuela y otras regiones Tropicales, Caracas.

**Rozo, D. & T. Aparicio. 1944.** Tablas y fórmulas para uso del Hipsómetro y para la refracción atmosférica. Bogotá.

# **EFFECTOS DEL TERREMOTO DEL 6 DE JUNIO DE 1994, EN LA REGION AL ORIENTE DE SILVIA (DEPARTAMENTO DEL CAUCA, COLOMBIA)**

por

**Jairo Mojica<sup>1</sup>**

## **Resumen**

**Mojica, J.:** Efectos del terremoto del 6 de junio de 1994, en la región al oriente de Silvia (Departamento del Cauca, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 71-92, 1996. ISSN 0370-3908.

Se describen los efectos del sismo de magnitud 6.4 (escala de Richter), ocurrido el 6 de junio de 1994, y en particular los observados al E de Silvia, flanco W de la Cordillera Central. En la zona epicentral (ladera SSW del Volcán Nevado del Huila, 15 km al N de la población de Toez), el terremoto alcanzó una intensidad de 8 a 9 grados en la escala de Mercalli y causó la destrucción de numerosos asentamientos humanos y la muerte o desaparición de unas 1000 personas; el número de damnificados se estimó en 40.000, la mayoría de ellos indígenas paeces y guambianos. Simultáneamente se produjo la desestabilización de numerosos taludes y se desencadenó un flujo de escombros por el río Páez, que arrasó buena parte de las construcciones encontradas a su paso.

**Palabras claves:** Terremoto - daños - flujo de escombros - deslizamientos - Silvia - Departamento del Cauca - Colombia.

## **Abstract**

This paper describes the damages produced to the east of the town of Silvia (Dpto. Cauca) by a shallow earthquake of magnitude 6.4 on the Richter scale which occurred in the SSW flank of the Nevado del Huila Volcano (Central Cordillera) on June 6, 1994. In the epicentral area (15 km N of Toez) the intensity reached a degree of 8 to 9 on the modified Mercalli scale. As a consequence approx. 1000 persons died or disappeared and more than 40.000 were injured. The quake also triggered several landslides and slumps on steeply inclined hillsides, as well as a mediumsize debris-flow along the Paez river that destroyed almost all the civil buildings that obstructed the way of this high density current.

**Key words:** Earthquake - damages - debris-flows - landslides - Silvia - Department Cauca - Colombia.

<sup>1</sup> Profesor Asociado. Depto. de Geociencias - CEPREVE. Universidad Nacional de Colombia Apartado 14490 Santafé de Bogotá, Colombia.

## 1. Introducción

Se describen aquí algunos de los efectos del terremoto del 6 de junio de 1994, con epicentro en las proximidades suroccidentales del Volcán Nevado del Huila, que causó daños de grandes proporciones en amplias zonas de los Departamentos del Huila y del Cauca y que fue percibido en casi todo el país. El trabajo se basa en la información recolectada directamente durante una visita de 5 días (17 a 21 de junio) a la región circunvecina al Municipio de Silvia, Departamento del Cauca, realizada por el autor y el alumno Diógenes Rovira, de 8° semestre de la Carrera de Geología. La comisión se llevó a cabo a instancias de la Universidad Nacional, a través de las Vicerrectorías y de su Centro para la Prevención de Desastres (CEPREVE), que ante la gravedad de los sucesos, decidió enviar una delegación integrada por alumnos y profesores de diferentes disciplinas, para que colaborara en las tareas de rescate, apoyo en salud, diagnóstico de los daños materiales y evaluación del impacto ambiental en la región afectada.

Durante el tiempo de permanencia y de acuerdo con las prioridades marcadas por la comunidad guambiana, se inspeccionaron, conjuntamente con varios guías locales y otros alumnos de esta universidad, los sitios y localidades en donde se dieron los mayores daños, la mayoría de ellos en jurisdicción de Silvia. Por falta de tiempo y facilidades de transporte apropiado (helicóptero), no fue posible el acceso a los lugares situados en la parte más alta de la Cordillera Central (e.g. Toez, Huila, Mosoco) que evidentemente sufrieron los efectos más severos del sismo que nos ocupa. Por otra parte y como complemento, se llevó a cabo una muy breve inspección en la población de Mondomo, ya en el valle del río Cauca, donde curiosamente, a pesar de su lejanía de la zona epicentral (50 km), se produjeron daños severos que arrasaron unas 45 casas del barrio Belén.

El resultado de las observaciones iniciales se consignó en un informe inédito (Mojica, 1994) que, revisado y complementado sirvió de base para la elaboración del presente documento. Para ello se utilizaron datos derivados de la bibliografía, de informes de INGEOMINAS, de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) - dependiente del mismo-, y de información extractada de diferentes medios de comunicación, en especial en lo que se refiere a las áreas no visitadas por nosotros.

## 2. El sismo

El terremoto se produjo a las 3.47 p.m. hora local (20.47 GMT), y tuvo epicentro en las proximidades

septentrionales de la población de Toez, localizada en la ladera SSW del Volcán Nevado del Huila (5.750 msnm, según los mapas oficiales del IGAC), que aquí representa la cúspide de la Cordillera Central y la divisoria de aguas entre las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca (Fig. 1). De acuerdo con la información dada a conocer por la RSNC/INGEOMINAS, el sismo (denominado "Sismo de Páez"<sup>2</sup>) alcanzó una magnitud de 6.4 en la escala de Richter, se produjo a una profundidad menor de 10 km. En la escala modificada de Mercalli (Bolt, 1981), el movimiento telúrico tuvo una intensidad de 8 grados a unos 40 km alrededor del epicentro, y de 5 a 6 grados, a unos 100 km hacia el NW, E y SW. Como consecuencia resultaron severamente afectadas las poblaciones, caseríos y áreas rurales situadas alrededor de la zona epicentral, habitadas más que todo por grupos indígenas guambianos, en la vertiente occidental de la Cordillera Central, y paeces en la vertiente oriental de la misma.

Asimismo, por efecto del terremoto se produjo la desestabilización de innumerables taludes en los terrenos ubicados en unos 40 km a la redonda del epicentro, pero principalmente en los más cercanos a él; se generaron así múltiples deslizamientos y agrietamientos, muchos de los cuales se manifestaron como derrumbes de grandes proporciones, desplomes y caídas de rocas, que dejaron extensas laderas libres de vegetación y suelo; otros evolucionaron hacia deslizamientos rotacionales y flujos de tierra que afectaron más que todo áreas rurales de cultivo y pastoreo. Todo ello, sumado al pánico causado por el sacudón inicial, el elevado número de réplicas, y los múltiples daños a las viviendas, obligó a los moradores, a abandonar sus tierras y a buscar refugio en improvisados albergues de plástico y carpas (Fotos 1 y 2).

Subsecuente al sismo se desencadenó un flujo de escombros de menores proporciones, que el que destruyó, por ejemplo, la ciudad de Armero el 13.11.85, descrito por Mojica *et al.* (1985). El flujo causado por el movimiento telúrico del 6.6.1994 siguió el curso del río Páez y arrasó a su paso múltiples obras civiles (viviendas, puentes, tramos de carretera, tomas de acueductos). La avenida produjo también el depósito de un volumen importante, pero aún no determinado, de sedimentos, detritos vegetales y restos de animales y de humanos en la desembocadura al río Magdalena, que allí coincide con la parte final del embalse de Betania. Según INGEOMINAS (1985), el flujo principal alcanzó alturas entre 10 y

<sup>2</sup> Dado que esta palabra hace referencia a la comunidad paez, lo correcto sería escribir Paez, y no Páez.

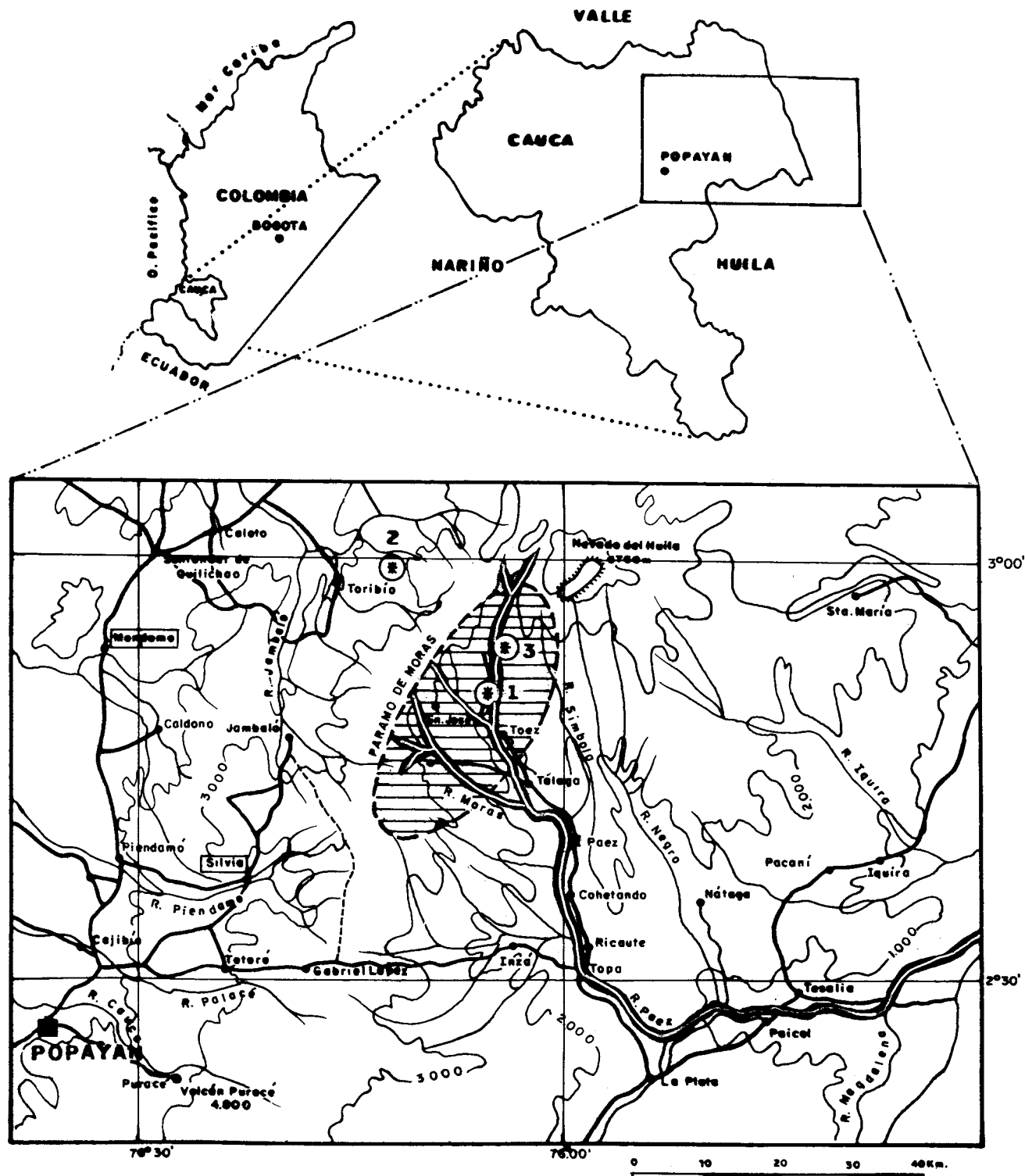


Figura 1. Mapa de localización general. Los asteriscos muestran la ubicación del epicentro del sismo del 6.6.94; según INGEOMINAS (1), la Universidad de Harvard (2) y este trabajo (3). El sector destacado con líneas horizontales representa la zona con daños más pronunciados. Los cauces resaltados en gris corresponden a franjas afectadas por flujos de escombros subsiguientes al sismo.

40 m y velocidades de 50 a 60 km en las cabeceras del río Paez, y de 20 a 40 km a su llegada al Valle del Magdalena (región de Paicol).

El terremoto fue causado, de acuerdo con INGEOMINAS (1994), por el movimiento de la Falla de Moras, que corre próxima al Nevado del Huila; según los reportes de los funcionarios de esta institución, que sobrevolaron la zona de desastre, a pesar de que el epicentro estuvo a sólo 10 km del nevado, el casquete glaciar no resultó afectado y se descartó, por lo tanto, la idea inicial difundida por diferentes medios, de que durante el sismo hubieran ocurrido avalanchas de nieve, que pudieran haber originado o alimentado los flujos de escombros desencadenados luego del movimiento telúrico, en diversos cursos de la cuenca alta del río Paez y encauzados luego por el lecho principal del mismo.

El número de personas muertas o desaparecidas no fue establecido con claridad, pero se estima en unas 1000. Asimismo, los efectos combinados del sismo, de los deslizamientos y del flujo de escombros, dejaron una cifra de cerca de 40.000 damnificados, que perdieron sus viviendas y/o sufrieron pérdidas en ganado y daños en cultivos. Por lo demás, las entusiastas pero apresuradas labores de rescate, llevadas a cabo más que todo por medio de helicópteros, condujeron a la desintegración temporal de un sinnúmero de familias.

Por otro lado, la baja densidad de las vías de acceso, lo abrupto de la topografía, la carencia de suficientes medios de comunicación y el mal clima (lluvioso y nublado en esos días), dificultaron tanto las labores de rescate y de ayuda que, 15 días después del sismo, seguían apareciendo damnificados de zonas lejanas o aisladas, que todavía no habían recibido auxilio alguno.

### 2.1 Mecanismos focales

A través de INGEOMINAS/RSNC (1994) se dieron a conocer los mecanismos focales mostrados en la figura 2. Uno de ellos fue obtenido por la RSNC, con base en análisis de primeras llegadas de ondas P en 15 estaciones sismológicas del centro, suroccidente del país y norte del Ecuador. El otro fue obtenido por la Universidad de Harvard, por el método de tensores de momento. Como se aprecia en la figura 2, las soluciones, aunque similares en la ubicación de los cuadrantes de compresión sísmica, presentan diferencias en cuanto a la posición, orientación e identificación del plano de falla. Ambos resultados corresponden a fallas de desplazamiento lateral, izquierdo si se selecciona como plano principal el de dirección WNW

(Universidad de Harvard), derecho si se asume como plano de movimiento el de dirección NNE (INGEOMINAS/RSNC). La información derivada de las réplicas hasta junio 30/94 (Fig. 3) ha permitido establecer que el movimiento principal ocurrió efectivamente en la dirección NNE, a lo largo de una zona de fractura de unos 45 km; las réplicas dispersas muestran, no obstante, movimientos de reacomodamiento de bloques corticales en la dirección del plano secundario (WNW) que coincide, además, con la orientación del lineamiento (o "falla") de Cali, propuesto por Ujueta (1988), mostrado en la figura 4. Los movimientos antedichos son compatibles con una cupla de fuerzas paralelas a la dirección del fallamiento, o con un par coplanar que bisecte los cuadrantes de distensión sísmica.

### 2.2 Tectónica regional

Como se observa en la figura 4, la esquina SW de Colombia se caracteriza por la presencia de numerosas fallas, más o menos paralelas a los ejes de las cordilleras, la mayoría de ellas de tipo inverso o de cabalgamiento, con vergencia al NW o al SE; otras, las menos, tienen desplazamiento de rumbo. Entre las más importantes se destacan las de Suaza, Garzón-Algeciras, Chusma, Romeral y del Cauca. Se tienen además fallas y lineamientos transversales, poco conocidos, pero sobre los cuales han llamado la atención Gómez (1986), Ujueta (1988) y Cuervo (1995). Se trata, en la mayoría de los casos, de fracturas con desplazamiento sinistral. El conocimiento que se tiene de la sismicidad histórica indica que muchas de las fallas antedichas o mostradas en la figura 4 son activas, o deben considerarse como potencialmente activas, lo cual explica el elevado número de sismos anuales en este sector del país, y su extensa distribución areal.

### 2.3 Sismicidad histórica

En la época histórica, la región SW de Colombia ha sido escenario de múltiples y devastadores terremotos (Tabla 1) que son recordados, ante todo, cuando han causado daños importantes en las poblaciones mayores del suroccidente colombiano. Entre los más notables se tienen el de "Tumaco" en 1906, que tuvo epicentro costa afuera y dió lugar a un tsunami de grandes proporciones, el de Popayán en 1983, el de Pasto en 1947, el de Cali en 1766 y el de Vegalarga en 1967, este último descrito en detalle por Ramírez (1967).

### 3. Aspectos geológicos

La región asolada por el sismo que nos ocupa comprende, como ya se dijo, ambas laderas de la Cordillera



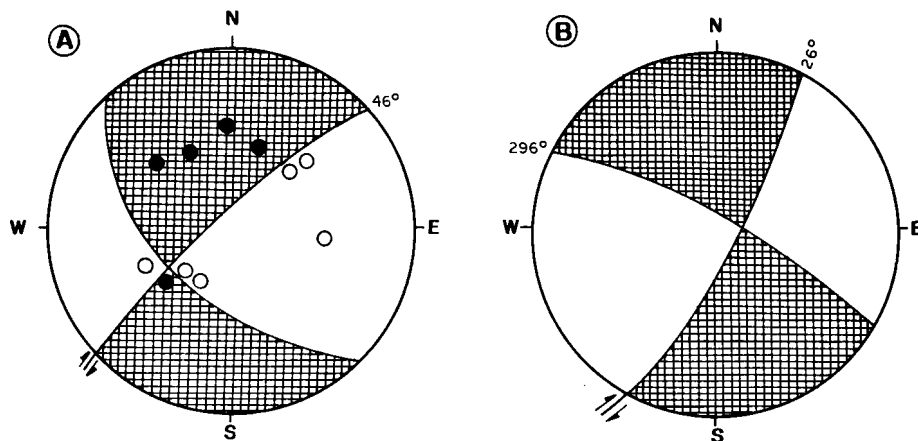


Figura 2. Mecanismos focales correspondientes al sismo del 6.6. 1994. A: según INGEOMINAS/R SNC (1994); B: según Universidad de Harvard.

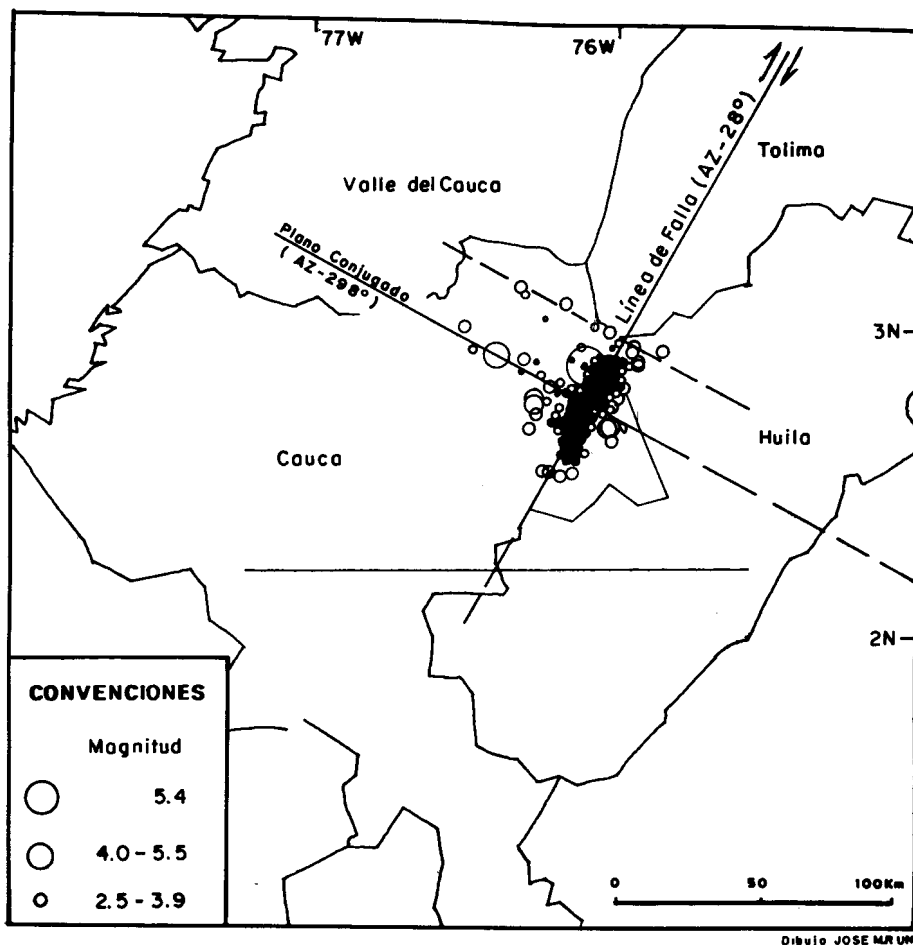


Figura 3. Epicentros de las réplicas del terremoto del 6.6.1994 (hasta junio 30/94), con indicación de la falla principal y del plano ortogonal. La longitud de la ruptura a lo largo de la falla principal, indicada por las réplicas, es de unos 50 km. Complementado de INGEOMINAS/R SNC (1994).

Central colombiana, y se encuentra a unos 100 km al N del Nudo de Los Pastos (sitio de la bifurcación entre las Cordilleras Central y Occidental), e inmediatamente al S del Nevado del Huila, un enorme edificio volcánico, ante todo andesítico-dacítico (Ramírez, 1975), que descansa sobre rocas intrusivas granodioríticas a cuarzdioríticas, posiblemente mesozoicas. Se trata de materiales muy sensibles a la meteorización y a la remoción en masa, que representan la continuación meridional del Batolito de Ibagué, y que constituyen, en este sector, la mayoría de los afloramientos de la vertiente oriental de la Cordillera Central. Del Volcán del Huila no se registran erupciones durante el tiempo histórico; sin embargo, la actividad fumarólica observada en la actualidad permite considerarlo como un volcán "semiaactivo". Los espesos flujos de escombros que cubren las riberas del río Paez entre La Plata y su desembocadura en el río Magdalena, sugieren una fuerte actividad eruptiva del Nevado del Huila en tiempos subrecientes (Pleistoceno tardío). De todos modos, con motivo de la tragedia producida en Armero en noviembre de 1985 por la erupción del Volcán del Ruiz, el Gobierno Nacional inició la implementación de un sistema de vigilancia en muchos de los volcanes colombianos, entre ellos el del Huila.

Como lo ilustra Orrego (1982), en la parte más alta de la cordillera y al SW del Volcán del Huila afloran también rocas ígneas y metamórficas, con edades no bien definidas entre el "precretácico" y el Terciario-Cuaternario. Las rocas metamórficas incluyen: a) neises y esquistos cuarzosomocovíticos grafitosos, asignados a la facies de esquistos verdes con metamorfismo de baja presión y alta temperatura, y considerados tentativamente por Orrego (*op. cit.*) como de edad precretácica; por sus características y localización, este conjunto



**Tabla 1.** Sismicidad histórica en el suroccidente colombiano. Extractada de **Ramírez (1975)** y **CERESIS (1985)**. En la intensidad, R significa escala de **Ramírez (1975)**, inventada por dicho autor para evaluar sismos históricos sin registro instrumental, y que en la escala modificada de **Mercalli (M)** equivale aproximadamente así: IR  $\pm$  1-4 M; IIR  $\pm$  5- 6 M; IIIR  $\pm$  7-10 M

LOCALIDAD	FECHA D M A	INTENSIDAD		MAGNITUD	COORDENADAS	
		R	M			
Cajibío, Cauca	2.2.1735	III			76,5°W	2,6°N
Popayán	2.2.1736	III			76,5°W	2,5°N
Popayán	25.4.1751	II			76,5°W	2,5°N
El Tablón, Cauca	20.1.1834	III			76,9°W	2,5°N
Popayán	4.10.1878	II			76,5°W	2,5°N
Popayán	25.5.1885	III			76,5°W	2,5°N
"Tumaco",	31.1.1906	III		8,6	81,5°W	1,0°N
Micay, Cauca	30.1.1920			6,0	77,5°W	3,0°N
Belén, Cauca	21.5.1937			6,5	77,5°W	2,5°N
Popayán	9.7.1945			6,5	76,5°W	2,5°N
Volcán Puracé	29.3.1946	III			76,5°W	2,5°N
Pasto	14.7.1947	II			77,2°W	1,2°N
Cali-Buga	9.7.1766	III			76,3°W	2,9°N
ENE Neiva, Huila	9.2.1967			6,3	74,9°W	2,9°N
Popayán	24.2.1967			4,2	76,3°W	2,6°N
Vegalarga, Huila	18.10.1973			6,2	74,9°W	3,0°N
Tacueyó, Cauca	3.2.1974			4,3	76,1°W	3,1°N
Cali	24.8.1974		7	7,9	76,8°W	4,3°N
Popayán	31.8.1983	III			76,5°W	2,5°N

recuerda al conocido Grupo Cajamarca de **Nelson (1959)** que conforma en buena parte el núcleo de la Cordillera Central; b) unidad de metabasitas y metasedimentitas, piroxenitas y anfibolitas, también en facies de esquistos verdes asignados, con duda, al Cretácico.

Las rocas ígneas comprenden: a) cuerpos de andesitas porfiríticas, y pórfidos andesíticos y dioríticos que muestran importantes mineralizaciones cupríferas (con Mo, Au, Pb, Zn y Ag), todos ellos emplazados durante el Terciario; b) lavas andesíticas, aglomerados y tobas de la plio-pleistocena formación Popayán. Se tienen además acumulaciones de sedimentos aluviales y coluviales, del Cuaternario.

Los elementos tectónicos más importantes en el sector descrito por **Orrego (op. cit.)**, son fallas con tres direcciones principales: NE, entre ellas la que controla el curso del río Moras, o Falla de Moras; NNE, como la que corta el Cerro de La Soledad; NW a NNW, que cruzan oblicuamente la cordillera.

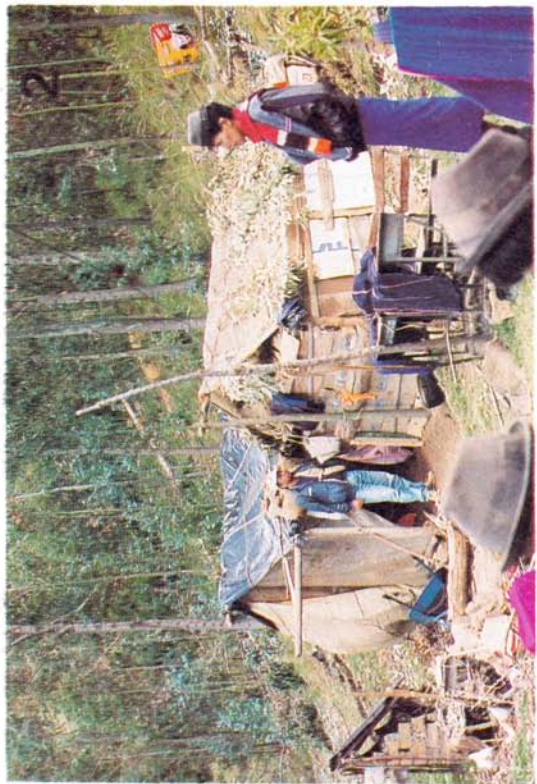
En el área estudiada, en las proximidades orientales de Silvia, se presentan esencialmente tres conjuntos de rocas que, debido a sus diferentes propiedades físicas, dan lugar a una morfología variada, en la que alternan zonas escarpadas y colinas suaves. En las partes más altas (arriba de los 3.000 m) se conservan también geofomas, muchas veces desdibujadas, de tipo glacio-

génico como valles en U, montañas aserradas y lagunas en antiguos circos glaciares (Fotos 3 y 4).

- La unidad más antigua, al parecer de edad cretácica, son esquistos micáceos grises, algunas veces ricos en glaucófana (**Feininger, 1978; Orrego et al., 1980**), poco resistentes a la erosión y expuestos localmente en las cabeceras de la quebrada Juanambú y el pie suroccidental del Cerro El Peñón al NNE de Silvia. Estas rocas hacen parte de la así llamada "Unidad de Esquistos Glaucofánicos Jambaló" por **Orrego et al. (op. cit.)**.

- Cronológicamente, siguen vulcanitas grises oscuras, algo porfiríticas, duras y resistentes a la erosión, que constituyen los cerros y picos más altos, así como el sustrato en la mayor parte de los sitios examinados en esta oportunidad. Se trata, por lo visto, de lavas andesíticas provenientes de volcanes pleistocenos, ahora inactivos.

- Como elemento más joven (Pleistoceno tardío a Holoceno) se tienen flujos piroclásticos y tobas inconsolidadas (cenizas con algo de lapilli), todas de colores claros, blanco-amarillentas a beige-marrón, que constituyen -por su origen a partir de lluvias de ceniza- una cubierta mantiforme que recubre la topografía preexistente y la suaviza. El espesor de estas rocas piroclásticas puede variar entre 0 y quizás 1 o más decenas de metros. Se trata, por su naturaleza, de materiales poro-



**Foto 1.** La comunidad guambiana reunida para tratar los problemas acarreados por el sismo del 06.06.94. Nótese los agritamientos (flechas) cerca de los techos de la vivienda y la viga de madera, colocada para prevenir mayores daños.

**Foto 2.** Ante la gravedad de los daños sufridos por las construcciones durante el sismo, muchas casa tuvieron que ser abandonadas. Como solución inmediata se improvisaron viviendas de madera y plástico.

**Foto 3.** Panorámica en la zona de páramo al oriente de Silvia y al norte de Gabriel López. Los picos aserrados (flechas finas) y los valles en U (flechas gruesas) son modelados pleistocenos de origen glaciar, a los que se ha sobrepuesto la actividad fluvial reciente. Las áreas en verde claro en primero y segundo plano son ante todo cultivos de papa y cebolla.

**Foto 4.** Antigua laguna fluvio-glacial al W del sitio La Loca, vía Silvia-Gabriel López, con desarrollo de turberas y vegetación actual de pastos y frailejón. A pesar de la escasa pendiente, durante el sismo se produjo el deslizamiento indicado por las flechas, en el que pueden diferenciarse la corona (extremo derecho), una zona central menos deformada y con un vacío de material (mancha blanca), y el pie, caracterizado por amontonamientos y abultamientos de la masa en movimiento. Foto tomada hacia el sur.

esos muy sensibles a la meteorización y a la erosión, que se descomponen rápidamente y que pueden acumular bastante agua en épocas lluviosas, lo cual los hace propensos a los procesos de remoción en masa (Foto 5). Sin embargo, la riqueza de estas rocas en minerales fácilmente alterables (feldespatos, micas, vidrio volcánico) da lugar a suelos de alta fertilidad, apetecidos para los cultivos de clima frío, como papa, cebolla y otras hortalizas, lo cual, cuando las pendientes son fuertes, los convierte en presa fácil de la erosión.

Por otro lado, las rocas piroclásticas constituyen una cubierta que, como ya se dijo, enmascara la paleotopografía, y dificulta la identificación de rasgos tectónicos antiguos, como diaclasas, fallas y pliegues. En la cartografía preexistente se las asigna a la "Formación Popayán", que recubre extensas áreas del valle del Cauca y la vertiente occidental de la Cordillera Central. Según **Marín & París (1979)**, la formación Popayán incluye además de las piroclásticas arriba mencionadas, aglomerados, flujos de lodo, depósitos lacustres y de piedemonte y acumulaciones fluvio-glaciares. Dichos autores la ubican en el límite Terciario-Cuaternario, o sea en el Plio-Pleistoceno.

#### 4. Aspectos climáticos y drenaje

En la región estudiada, con altitudes entre 2.500 m (en Silvia) y 3.600 m (en la loma de La Campana), se presentan dos épocas lluviosas muy marcadas (enero a mayo y agosto a octubre) y dos intervalos relativamente secos (junio-julio y noviembre-diciembre). La precipitación varía, según **West (1956)** entre 2.000 y 3.000 mm/año, con valores altos en los meses de enero, mayo y octubre, que como lo enseña la práctica, son los tiempos más propicios para la ocurrencia de deslizamientos, represamientos de los cauces fluviales y ocurrencia de avenidas sedimentarias. De acuerdo con los mapas de **Eslava (1993)**, la región estudiada incluye los climas templado húmedo, frío húmedo y páramo húmedo, o cae simplemente en el tipo general de clima "húmedo lluvioso". La vegetación está constituida más que todo por pastos y los cultivos arriba mencionados en las tierras agrícolas y por arbustos y algunos bosques nativos en áreas no cultivadas. El clima húmedo lluvioso y la casi omnipresencia de rocas piroclásticas en superficie ocasiona la ocurrencia de innumerables nacimientos de agua, aprovechados por los habitantes para el consumo casero y el riego. No obstante los aspectos positivos anotados, estos nacimientos son también, como se explica más adelante, lugares propicios para la generación de deslizamientos locales.

El drenaje aquí está dominado por las dos corrientes mayores que descienden del páramo, los ríos Piendamó y

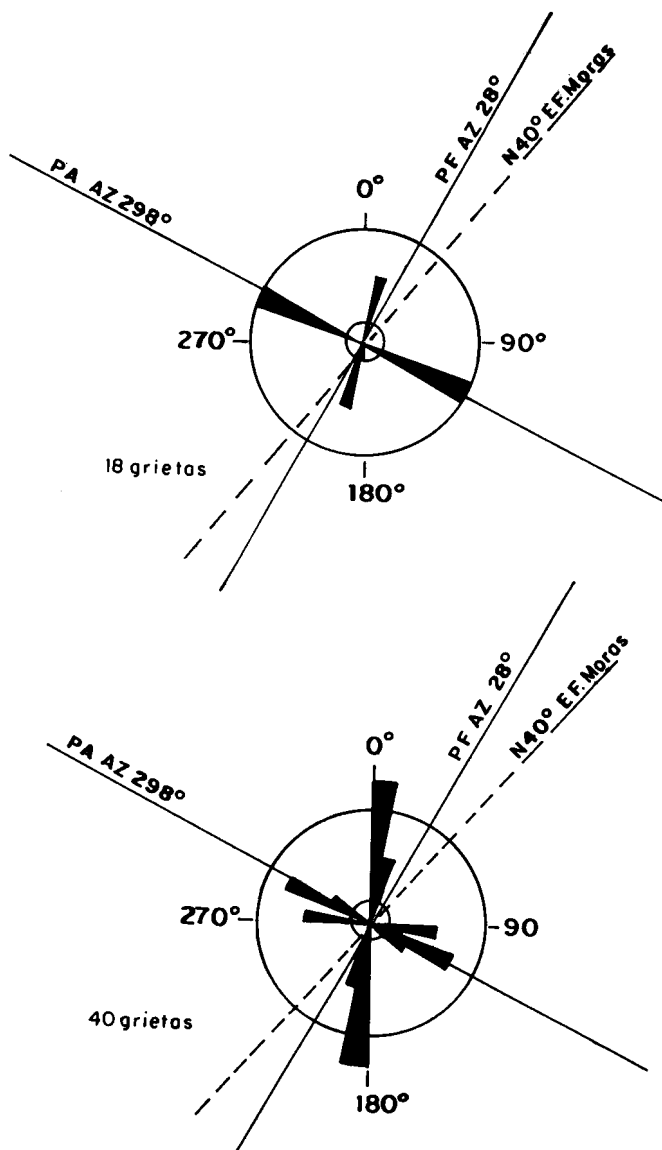
Cofre, caracterizados por su flujo perenne y sus aguas frías, de color acaramelado. En la región circunvecina a Silvia, el drenaje local muestra un arreglo entre paralelo y ortogonal, con cursos que varían entre SSE-NNW y NNE-SSW, lo cual sugiere un marcado control tectónico por diaclasas y fallas. No se ven aquí los diseños radiales propios de los edificios volcánicos, presentes, por ejemplo, en el "Cerro Nevado" de Pan de Azúcar, el Cerro Chiquillo y el Volcán Puracé, al oriente de Popayán, y del Nevado del Huila al N de Toez, a los cuales han de deberse las acumulaciones vulcano-sedimentarias que dieron lugar a la formación Popayán.

#### 5. Daños producidos por el sismo

En la región inspeccionada se pudo comprobar que, en orden creciente de importancia, el impacto del terremoto del 6.6.94 se manifiesta más que todo en forma de:

##### 1- Agrietamientos y corrimientos del terreno (notorios en zonas con terraplenes y cáminos), con el consecuente peligro de deslizamiento a corto plazo.

Este tipo de daños se observó principalmente a lo largo de la vía que, de manera circular, une las poblaciones de Silvia y Gabriel López, y en particular entre el sitio La Loca y la vereda La Cumbre en donde, en dos puntos, los agrietamientos amenazan con destruir entre 1 y 2 m de la banca de la vía (proximidades de la quebrada La Chorrera y W de la laguna de La Marquesa). Grietas semejantes, en todos los casos con separación entre 1 y 3 cm y con orientación preferencial casi E-W y N-S (Fig. 5), se encuentran también en los caminos que comunican las veredas de La Campana y El Cacique (Foto 6), al N del río Piendamó, así como en algunas áreas de cultivo de este sector. Al respecto es claro que las grietas, medidas en localidades diferentes y distanciadas por kilómetros, presentan un arreglo de dos sistemas que se cortan casi ortogonalmente. El significado de dicho arreglo no es claro: a primera vista, podría pensarse en un patrón de fracturas conjugadas, según lo pronostica la mecánica de rocas (teoría de Mohr-Anderson) en un sistema triaxial de esfuerzos, en el cual la dirección del máximo esfuerzo se encuentra en la bisectriz del ángulo agudo conformado por los dos sistemas de fracturas, y la de mínimo esfuerzo en la bisectriz del ángulo obtuso, o sea NNW-SSE, lo cual estaría en contradicción con las posibles direcciones de esfuerzos indicadas o derivadas de los mecanismos focales arriba mencionados. Más bien, los sistemas de grietas en cuestión



**Figura 5.** Diagramas rosa que muestran las orientaciones preferenciales de las grietas producidas en el terreno y en las viviendas por el sismo del 6.6.94: a) región al W del sitio La Loca; b) veredas La Cumbre y El Cacique. Como referencia, se dibujan el plano principal de falla (PF) en la zona epicentral (Fig. 3), el plano auxiliar (PA) y la dirección de la Falla de Moras.

tienden al paralelismo con los planos principal y auxiliar de los mecanismos focales (en particular con el deducido por la Universidad de Harvard), lo cual parece indicar que ellas representan grietas de extensión en las direcciones próximas a las de los planos focales.

Como medida preventiva inmediata para mitigar o detener los movimientos en las grietas, se recomen-

dó a los pobladores rellenarlas con arcilla y corregir o desviar los drenajes hacia las mismas.

- 2- **Deslizamientos de diferentes tipos y proporciones**, en especial derrumbes, deslizamientos rotacionales y flujos de tierra, en laderas de alta y mediana pendiente, que afectan sobre todo zonas de cultivo y las hoyas de algunas de las quebradas mayores. Asimismo, durante el sismo hubo múltiples desprendimientos de roca, uno de los cuales, según la vida de dos niños guambianos que se hallaban a campo abierto, en la vereda La Campana.

*Derrumbes.* Ocurrieron principalmente en la vía de Silvia a Gabriel López y a la laguna de Piendamó, taponándola en varios puntos (Foto 7). Se trata, no obstante, de desprendimientos de pequeña proporción, que no amenazan con convertirse en problemas mayores. Otros derrumbes, de mayor tamaño, se vieron, a lo lejos, en laderas empinadas próximas al sitio La Loca.

*Flujos de barro o de tierra.* Se observó uno, muy llamativo, a lo largo del cauce de la quebrada El Barrial, en la vereda Cumbre Nueva. Se trata de un lugar con varios nacimientos de agua que mantienen saturado el terreno adyacente al cauce, lo cual en el momento del sismo, propició la licuación y despeque de una franja de unos 40 a 50 m de ancho y unos 200 m de largo. Según los testigos, el material avanzó unos 300 m en 4 a 5 minutos, arrastrando la cubierta vegetal (Fotos 9 y 10), derribando árboles, destruyendo una casa adyacente al curso y casi interesando otra, al otro lado del cauce. En total el área afectada tiene una longitud de aproximadamente 800 m y una anchura variable de 20 a 40 m. El movimiento cesó en un sector de muy poca pendiente, a unos 300 m de la llegada de la quebrada El Barrial al río Piendamó y, seguramente, permanecerá estancado ahí por largo tiempo. Las grietas observadas en la corona indican que el movimiento tiende a progresar pendiente arriba, poniendo en peligro varios cultivos y dos construcciones no habitadas.

*Deslizamientos rotacionales.* Se presentan en múltiples sitios del área investigada, unos iniciados antes del sismo, otros causados por él. Los más importantes se dieron en:

- a- El sector al E de la vía Gabriel López-Silvia en las proximidades del sitio La Loca y el borde W de una antigua laguna glaciar. Se trata de un des-



**Foto 5.** Perfil superficial en una colina de la vereda La Cumbre, que muestra un suelo húmedo desarrollado sobre rocas piroclásticas de la formación Popayán, poco consolidadas, blancas y porosas. El espesor expuesto aquí es superior a 2.5 m.

**Foto 6.** Agrietamiento del terreno en el camino entre las veredas La Cumbre y El Cacique. Las grietas, con abertura de hasta 8 cm, se desarrollan en piroclastitas no consolidadas de la formación Popayán. Foto tomada hacia el oeste.

**Foto 7.** Pequeño derrumbe producido durante el sismo del 6.6.94 en el costado sur de la vía Silvia-Gabriel López, sitio La Chorrera.

**Foto 8.** Deslizamiento rotacional en las cabeceras de la quebrada Juanambú. Las flechas gruesas señalan el sentido del desplazamiento. En la corona (flechas finas) se observa un corte del suelo actual, desarrollado sobre piroclastitas de la formación Popayán.



**Foto 9.** Vista panorámica del flujo de barro en la quebrada El Barrial, vereda La Cumbre. Las flechas indican el sentido de avance del movimiento. Foto tomada hacia el sureste.

**Foto 10.** Detalle del flujo de barro mostrado en la Foto 9. Vista tomada en dirección aguas arriba de la quebrada El Barrial.

**Foto 11.** Detalle del deslizamiento rotacional mostrado en la Foto 4, al W del sitio La Loca. El lugar corresponde al sector central del corrimiento, donde quedaron parches sin el material deslizado (flechas gruesas), que debido a la violencia del sacudón se desordenó totalmente, colapsando los bloques en diferentes direcciones. Las flechas finas muestran un deslizamiento menor en el borde de la vía a Silvia. Foto tomada hacia el NNW.

**Foto 12.** Bloque de material desprendido por el deslizamiento mostrado en las Fotos 4 y 11. A la derecha se ve el suelo actual, pleno de raíces, desarrollado sobre piroclásticas inconsolidadas (tobas de lapilli) y por lo menos tres paleosuelos (franjas negras).



lizamiento, disparado indudablemente por el sismo, con forma de pera alargada (Foto 4), que se movió de occidente a oriente en una anchura de 100 a 150 m y una longitud cercana a 350 m. La pendiente del terreno deslizado es de apenas unos 5° y está constituido por una alternancia de horizontes húmicos negros (suelo actual y varios paleosuelos) y de rocas piroclásticas claras, con espesor total expuesto superior a 2,5 m (Fotos 11 y 12) que en conjunto producen un suelo saturado de agua que se mece con el movimiento de las personas, lo cual es propio de las formaciones lagunares, turbosas.

La masa desplazada se ve cortada por numerosas fallas normales en la zona de la corona y abultamientos en la parte terminal. No obstante, debido a la energía del sismo, incrementada por la escasa consolidación del terreno y la saturación de agua del mismo, se produjo una desorganización casi total de los bloques desprendidos, que aparecen volcados en diferentes direcciones; asimismo, en el sector central, quedaron parches vacíos por el corrimiento excesivo (despegue) del material en movimiento (Foto 11). Este grado de desorganización del material removido puede indicar también que, en este lugar, la aceleración vertical pudo ser próxima al valor de la gravedad.

De todos modos, el deslizamiento a más de espectacular, no causó prácticamente daños, dado que se trata de un terreno despoblado y sin cultivos.

- b- Escuela de Guambia Nueva, próxima a la quebrada Las Delicias (Fig. 6). Es esta una construcción con dos bloques de salones de clase de reciente construcción en ladrillo, y una casa antigua, en adobe, que sirve como salón comunal. Todas ellas sufrieron agrietamientos durante el sismo y en uno de los bloques de salones se hundió, peligrosamente, el techo de tejas de asbesto, soportadas por cerchas de lámina con perfil en U y uniones con tornillos.

Las instalaciones se encuentran en una explanación en el borde de un talud casi vertical dejado por un deslizamiento pretérito (Foto 13); durante el sismo se produjeron agrietamientos y hundimientos en el borde del talud, a unos 5 m del bloque más cercano de salones y se generó un deslizamiento rotacional en el pie del mismo

(Foto 14). Dicho deslizamiento, de pequeña proporción, afectó un suelo con mínima pendiente (menor de 10%) en una depresión húmeda que desemboca en la quebrada Las Delicias. En la corona se aprecian fallas normales con superficie cóncava, que profundizan hasta 1,5 m, con desprendimientos de un suelo desarrollado en rocas piroclásticas. La franja desplazada es de unos 25 m de ancho por unos 60 m de largo.

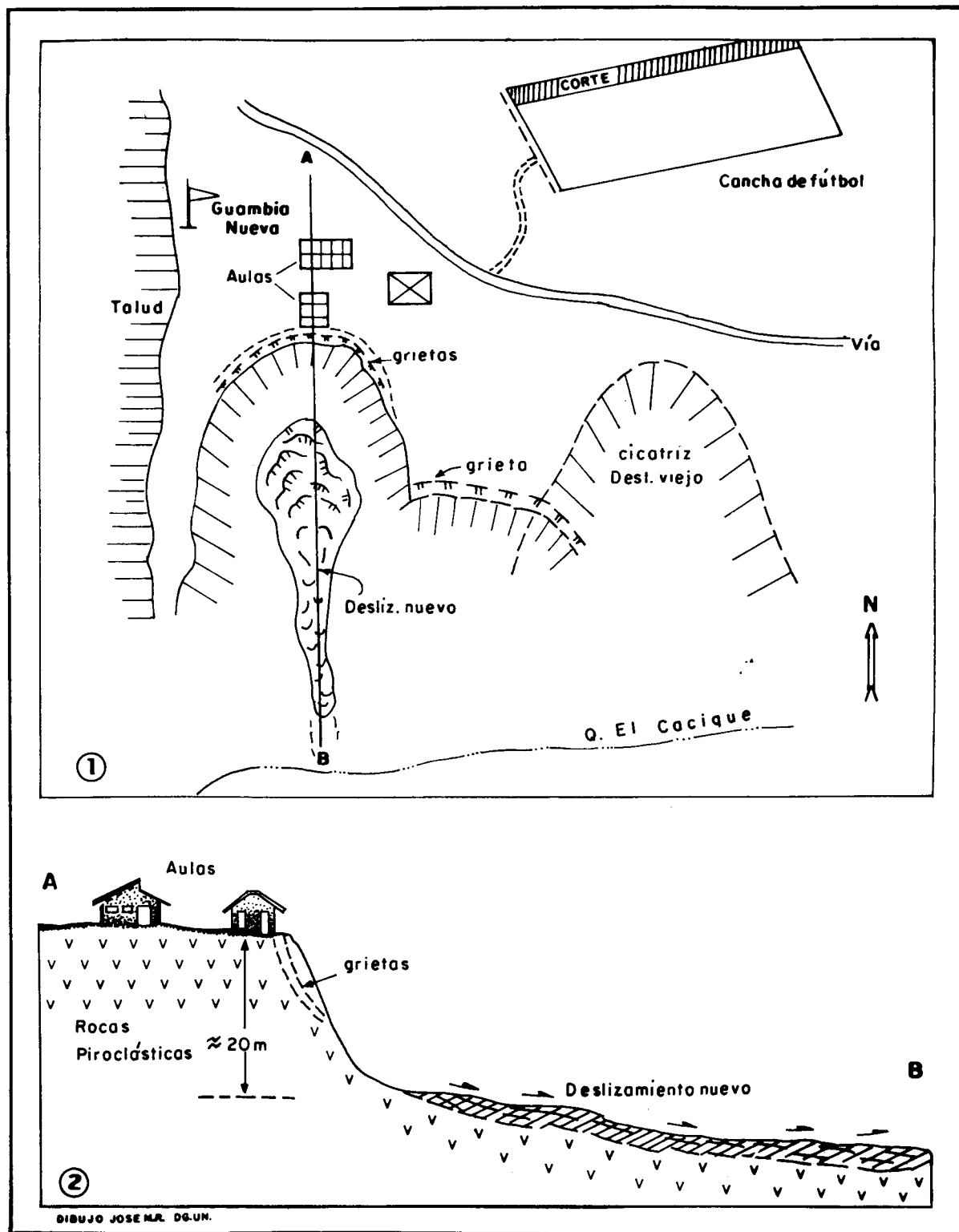
Dado que el deslizamiento tiende a ser retrogresivo, a que el talud está agrietado y que las construcciones antedichas sufrieron averías considerables, se aconseja trasladar las edificaciones hacia la actual cancha de fútbol, situada a unos 80 m al NE.

- c- Cantera Las Delicias (Fig. 7, Fotos 15 y 16). Deslizamiento localizado a unos 200 m adelante y al W de la desviación hacia Jambaló (vía Silvia-Jambaló). Aunque anterior, el deslizamiento debió agudizarse durante el sismo. El origen es sin duda la pérdida de soporte del talud por la extracción de material y el uso continuado de explosivos.

La cantera se encuentra al lado occidental de la carretera y consta de un patio de acumulación y carga y de un frente de extracción en una pared con unos 45° de inclinación, que en conjunto producen una superficie cóncava, abierta por el oriente. La diferencia de altura entre el piso de la cantera y el borde superior de la zona de extracción es de unos 35 a 40 m.

El material extraído consiste más que todo de rocas piroclásticas algo brechosas, que aquí hacen parte de un pequeño espolón que desciende hacia el oriente. En la parte más baja afloran también rocas verde-oscuras que incluyen diques? y brechas volcánicas.

Un recorrido por el sector arriba del borde del talud muestra que el espolón que constituye la fuente de materiales se encuentra agrietado en una longitud de cerca de 70 m; sin embargo, la distribución de las grietas no es uniforme, ya que las mismas se concentran hacia el borde del talud (6 a 7, espaciadas a más o menos 1 m) y hacia la corona (10 a 15 espaciadas a 1 y 2 m), quedando un sector intermedio casi libre de ellas. En el sector de la corona el movimiento rotacional a través de las rupturas produce



**Figura 6.** Deslizamientos rotacionales antiguos y recientes en la escuela de Guambia Nueva.

1. Croquis, en vista de planta, de la situación general.

2. Corte A-B, a lo largo de los bloques de aulas y el deslizamiento generado por el sismo el 6.6.94.

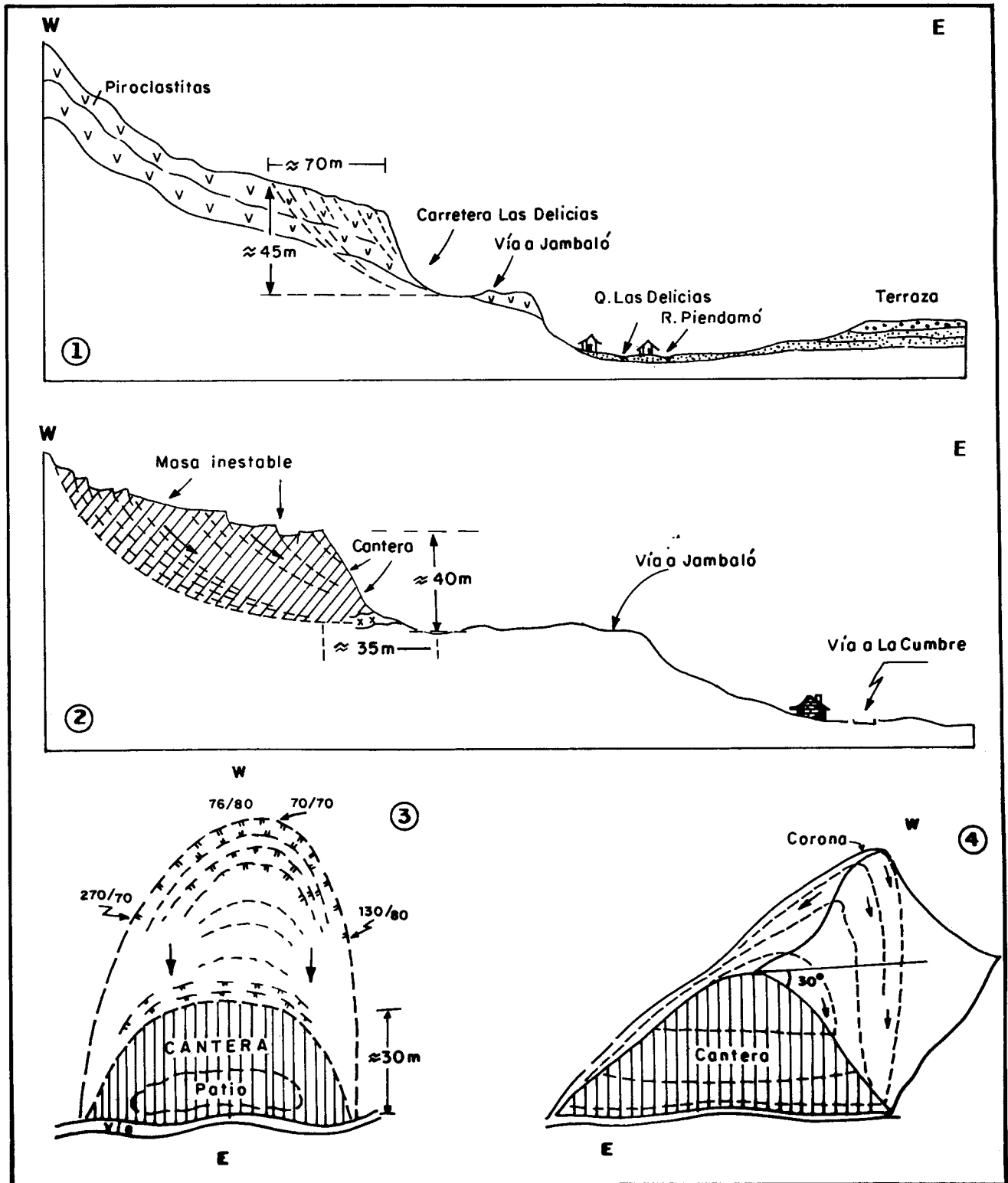


Figura 7. Esquemas diversos que ilustran la situación y magnitud del deslizamiento en la cantera Las Delicias. 1. Corte general E-W. 2. Ampliación del corte 1 en la zona del deslizamiento. 3. Vista de planta. 4. Bloquediagrama.

hundimientos hasta de 1.8 m (Foto 15), con aberturas de 1 a 3 decímetros; en el talud los hundimientos alcanzan hasta 1 m, calculándose un corrimiento total de la masa, hasta ahora, de unos 8 a 10 m. Todo ello permite deducir que se está ante un deslizamiento activo, de tipo retrogresivo, susceptible de dispararse de un momento a otro, sobre todo en los momentos de lluvias fuertes que incrementan el peso de la masa inestable y lubrican los planos de falla.

La distribución desigual y el desplazamiento observado en las grietas sugieren que el talud podría deslizarse como un todo, desde el pie del talud hasta la corona, lo cual llevaría a la caída de unos 173.000 m<sup>3</sup>, o de manera parcial cayendo: a) los veinte metros que siguen al borde del talud (equivalentes a unos 34.000 m<sup>3</sup> de material); b) luego los 30 m intermedios (aproximadamente 82.000 m<sup>3</sup>); y c) los 20 a 30 m del sector de la corona (aproximadamente 56.000 m<sup>3</sup>).

Un cálculo obtenido a partir de los datos logrados en el terreno, indica que la superficie cóncava de la cantera podría almacenar unos 33.000 m<sup>3</sup>, más o menos equivalentes al volumen desprendido en el caso de la opción a) arriba mencionada; ante las opciones b) y c), la capacidad de almacenamiento sería totalmente superada, lo cual significaría que el deslizamiento rebasaría la carretera y llegaría hasta la quebrada Las Delicias, afectando, seguramente, el puente de la vía Silvia-La Cumbre y unas 2 a 6 casas que se encuentran en la trayectoria a seguir por el material rocoso a deslizarse.

Por lo anterior, se aconsejó tomar medidas inmediatas que incluyen:

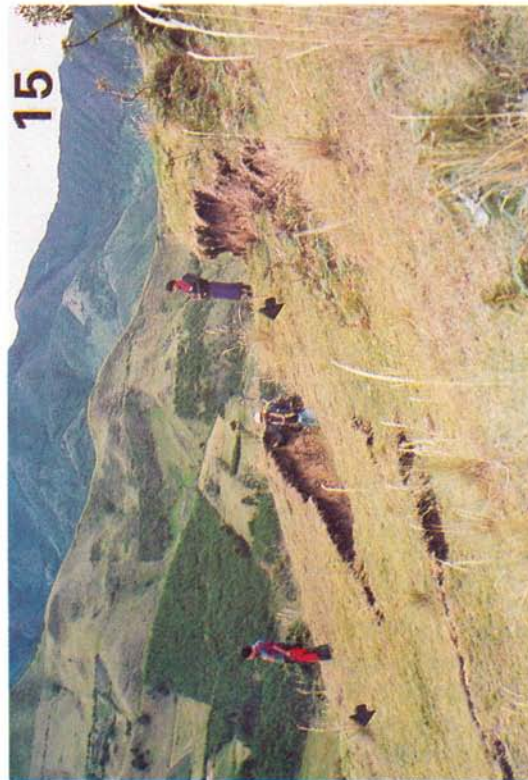
- Revisión y estudio detallado del problema, por parte de las autoridades competentes, en particular de la Secretaría de Obras Públicas del Cauca.
  - Suspensión de los trabajos de explotación en la cantera.
  - Evacuación de las viviendas amenazadas por el deslizamiento.
- d- Paso de la vía Silvia-Las Delicias-Jambaló sobre la quebrada Aguablanca. Se presenta aquí

un deslizamiento retrogresivo, anterior al sismo del 6.6.94, que sigue el cauce de la quebrada Aguablanca y abarca unos 50 m de ancho por más de 300 m de largo. El movimiento amenaza con desprender los 20 m de la vía que se encuentran a lado y lado de la quebrada, ya afectados por hundimientos de la banca y destrucción de parte del drenaje.

- e- La quebrada Juanambú, aguas arriba del primer puente de la vía El Crucero-Silvia, en el pie SSW del Cerro El Peñón. Ocurre aquí un deslizamiento rotacional (Fig. 8, Foto 8), desarrollado en piroclastitas amarillentas y derrubios de ladera que afecta el costado septentrional de la quebrada Juanambú y que se mueve de N a S; hasta el momento se ha desprendido una masa de unos 50 m de ancho y unos 70 m de largo, con hundimientos de hasta 4 y 5 m en la corona. En las proximidades, aguas arriba y aguas abajo de la quebrada Juanambú se ven cicatrices de movimientos anteriores; el que nos ocupa no se inició con el sismo de junio/94, sino con las lluvias fuertes de enero pasado. A la fecha de la visita, la zona de la corona, que se halla a unos 30 m de la vía, se encontraba seca, en tanto que la parte media y final estaban empapadas por aguas que brotan en el sitio. El deslizamiento ha llegado ya hasta el cauce de la quebrada Juanambú estrangulándolo, situación que, por lo escuchado de los moradores, no es nueva, ya que el año anterior otros deslizamientos lo obstruyeron, obligándolo a cambiar ligeramente de curso.

Afortunadamente, el examen del terreno muestra que las pendientes en ambas vertientes de la quebrada son bajas y que en el lugar del deslizamiento actual y de los previos no hay capacidad suficiente de embalse para causar una avenida sedimentaria importante, ya que el cauce puede obstruirse y destaparse gradualmente. De todos modos, se aconseja estudiar con más detalle el problema y tratar de detener los deslizamientos mediante la conducción directa a la quebrada, de los ojos de agua, y la arborización del sector, ahora dedicado al cultivo de pastos, papa y cebolla.

- f - Parte baja de la quebrada Manchay, en los extremos de Silvia. En una franja anterior y posterior al primer puente de la vía de Silvia hacia El Crucero, se tienen múltiples deslizamientos que afectan ambos costados de la quebrada



**Foto 13.** Aulas de clase de la escuela Guambia Nueva, al borde de un talud casi vertical, en el que afloran piroclastitas ocre de la formación Popayán.

**Foto 14.** Corona del deslizamiento rotacional en el pie del talud mostrado en la Foto 13. Afloran aquí tobas de la formación Popayán. La flecha muestra una grieta con hundimiento de casi 1 m. Véase también Fig. 4.

**Foto 15.** Corona del deslizamiento rotacional de la cantera Las Delicias, vereda Guambia Nueva. El hundimiento a través de las grietas alcanza aquí hasta 1.8 m. Las flechas indican el sentido de movimiento del material. Foto tomada hacia el sur.

**Foto 16.** Vista panorámica del deslizamiento de la cantera Las Delicias. La flecha indica el sitio de la corona mostrado en detalle en la Foto 15. Toma hacia el SW. Al fondo se ven escarpes fuertes desarrollados en vulcanitas andesíticas grises. En segundo plano: trazo de la vía Silvia-Jambaló.

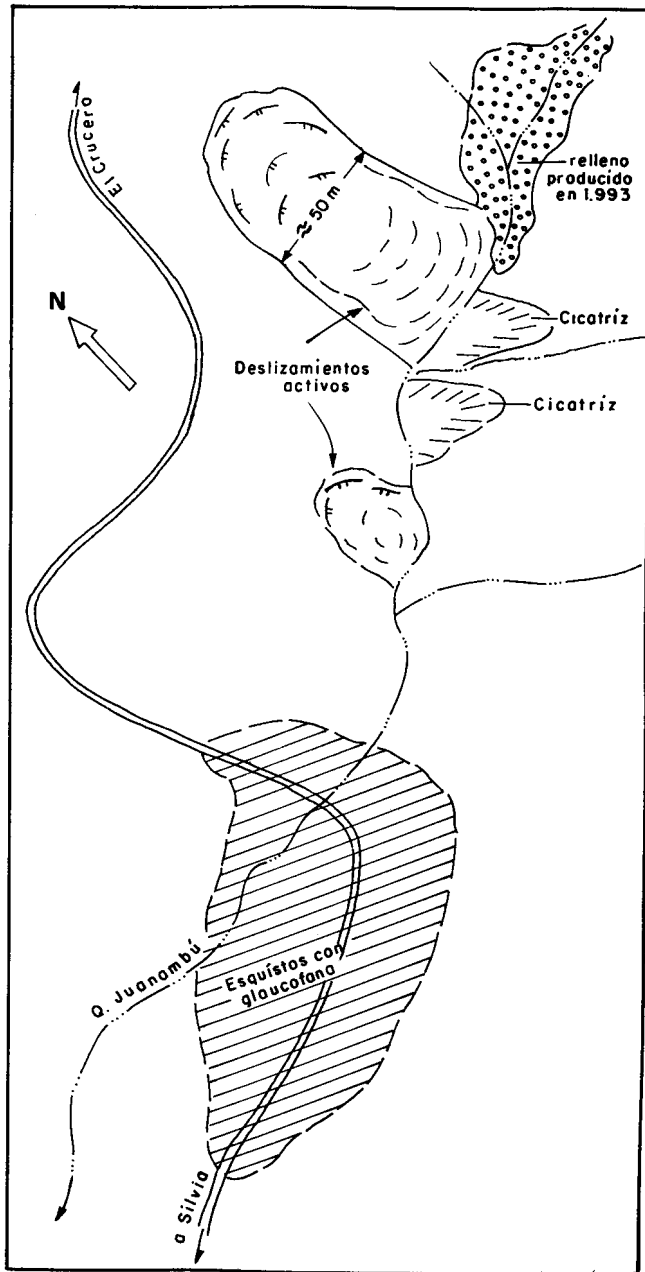


Figura 8. Esquema ilustrativo, en vista de planta, de la situación del deslizamiento rotacional en las cabeceras de la quebrada Juanambú al NNE de Silvia.

Manchay, pero ante todo el occidental (Foto 17), y en particular las vertientes de la quebrada indenumerada (Foto 18) que desemboca, viniendo del W, en las proximidades del puente, vertientes que muestran numerosos, pero modestos, derrumbes y procesos de erosión re-

gresiva acelerada. En todos los casos, el material en movimiento son rocas piroclásticas amarillentas a ocres, muy poco consolidadas.

Los deslizamientos en cuestión, más otros (con características de flujos de barro) localizados 1 km más al N, causaron meses atrás una crecida que cubrió con rocas, lodo y restos vegetales, el valle relativamente ancho (80-100 m) y plano que forma la quebrada Manchay a la entrada de Silvia. El efecto mayor esa vez fue el taponamiento temporal de la vía, que corre por el costado E del valle en cuestión. No obstante, debe anotarse que, ante crecientes mayores que la antedicha, quedan en peligro de ser arrasadas unas 15 casas del barrio Los Sauces, las cuales fueron construidas demasiado próximas al lecho activo y deberían, por lo tanto, ser trasladadas a lugares más seguros.

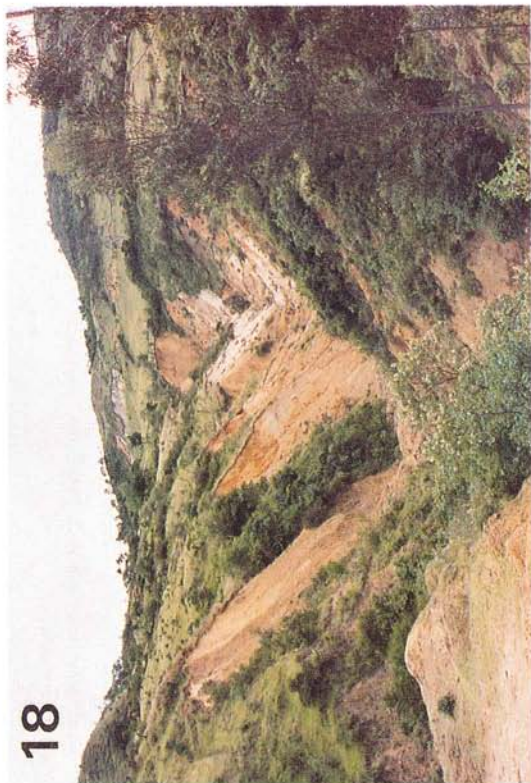
- 3- **Agrietamientos, hundimientos y colapso parcial o total de las edificaciones.** En conjunto constituyen el tipo de daños más nocivo y oneroso para la población y se dieron más que todo desde el oriente de Silvia hasta la cumbre de la Cordillera Central y en la región de Mondomo, en el valle del río Cauca.

#### Area de Silvia

En el casco urbano de Silvia los efectos del sismo fueron leves y sólo causaron agrietamientos menores en las edificaciones más antiguas, de adobe, y desprendimiento parcial de los pañetes de los techos, en guadua o caña de castilla revestida en cemento.

Los daños más notorios aparecen al E de Silvia, desde la altura de la vereda El Cacique, hacia la cumbre de la cordillera, donde prácticamente todas las edificaciones sometidas al sacudón resultaron afectadas hasta el punto de tener que ser demolidas o sometidas a complicadas y costosas reparaciones. El examen de numerosas de ellas muestra que el efecto del sismo es bien desigual, dependiendo del tipo de materiales usados para la construcción (aquí por tradición y bajo costo más que todo de adobe y bahareque), de la situación con respecto a la topografía y de la constitución del substrato.

Así, resulta claro que las construcciones más afectadas resultaron ser siempre las de adobe (Fotos 19 y 20), que debido a la poca adherencia del "cemento" o pegue de barró, durante el sismo se desintegraron y colapsaron, o se agrietaron y desencajaron hasta quedar totalmente inservibles. En las de bahareque,



**Foto 17.** Deslizamiento activo en el costado occidental de la quebrada Manchay (flecha), extramuros septentrionales de Silvia. El material que se desliza está compuesto por rocas piroclásticas inconsolidadas de la formación Popayán.

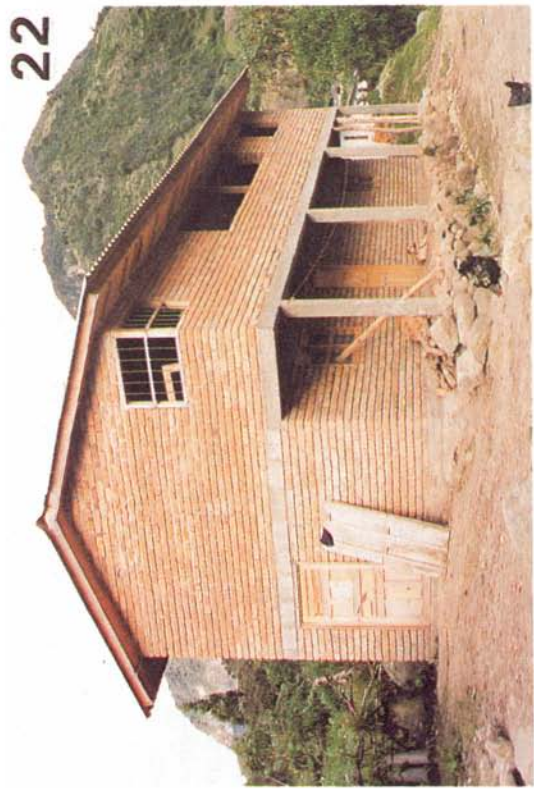
**Foto 18.** Deslizamientos recientes y erosión acelerada en una quebrada indominada, afluente de la quebrada Manchay, en un lugar próximo al mostrado en la Foto 17. Vista hacia el WNW.

**Foto 19.** Casa averiada por el sismo en la vereda La Cumbre. Nótese el arreglo en «X» de las grietas.

**Foto 20.** Detalle de un muro de adobe, que muestra bien el desprendimiento del cemento de barro y la inestabilidad del muro, que se sostiene por gravedad. La escasa adherencia del cemento in adobe propició la caída de los pañetes durante el sismo.



21



22



23



24

**Foto 21.** Casa de bahareque con agrietamientos fuertes cerca del techo.

**Foto 22.** Casa de construcción reciente, en ladrillo, vigas de amarre y columnas, que resistió bien la sacudida sísmica del 6.6.94. Sin embargo, internamente se ven grietas que afectan sobre todo las cornisas y las esquinas de los muros. Vereda La Campana.

**Foto 23.** Casa de bahareque, semidestruida por el sismo del 6.6.94 en el barrio Belén, al NW de Mondomo. Nótese que los mayores daños ocurren en las esquinas de los muros.

**Foto 24.** Casa en bloque y ladrillo, con vigas y columnas de concreto, que soportó bien el sismo, en el barrio Belén al NW de Mondomo. Los asteriscos muestran lugares en donde existían viviendas, arrasadas por el terremoto.



los daños fueron algo menores, pero de todos modos los muros, pisos y techos se agrietaron, inclinaron y/o desencajaron (Foto 21). Por regla general, las construcciones perdieron total o parcialmente los tejados, en su gran mayoría de teja de barro, colocadas en superposición, sin amarres apropiados.

Las escasas construcciones en bloque de cemento y ladrillo compacto o perforado soportaron mejor las sacudidas sísmicas, en especial aquellas con algún tipo de viga de amarre y/o columnas de concreto (Foto 22). Sin embargo, no faltan en ellas las grietas y los desencajes en los techos.

En relación con la influencia de las propiedades del substrato en los daños en las construcciones, debe anotarse que en el área al E de Silvia son pocas, dado que, invariablemente, las edificaciones reposan sobre las piroclastitas de la formación Popayán arriba mencionada; las escasas diferencias han de reflejar entonces cambios locales de espesor de la cubierta piroclástica y, seguramente, en el grado de saturación o humedad de las mismas. Sin embargo, parece ser que las construcciones localizadas en las crestas de las colinas y en el pie de los valles resultaron más afectadas que las situadas a media ladera, lo cual refleja, seguramente, un efecto topográfico.

Por otra parte, resulta evidente que las averías mayores en las edificaciones ocurren en las uniones entre el techo y las paredes, y en las esquinas entre los muros; las grietas tienden, muchas veces, a formar arreglos en "X" (Foto 19).

En el caso de las construcciones en adobe, es claro que durante el sismo (o quizás antes del mismo), el pegue entre los adobes perdió toda adherencia (Foto 20), quedando las viviendas en pie sólo por efecto del peso. Asimismo, muchas de las edificaciones de adobe y bahareque perdieron los pañetes, que por lo común, son motivo de prolija decoración.

La medición sistemática de las grietas en las construcciones permite identificar dos sistemas preferenciales, uno con azimut entre 90 y 110°, otro con azimut entre 0 y 20°, es decir un sistema casi E-W y otro casi N-S. Como se ve en la figura 3, la intersección de los sistemas de grietas forma ángulos ligeramente agudos en los cuadrantes N-W y S-E, lo cual sugiere que, si las grietas representan rupturas de cizalla, el arreglo anotado puede ser producto de una compresión SE-NW. Sin embargo, una confirmación al respecto se tendrá sólo cuando se

den a conocer las soluciones del mecanismo focal del terremoto del 6.6.94.

### Area de Mondomo

Gracias a la colaboración efectiva del cuerpo de policía y del comité local de emergencia, fue posible establecer, en una visita de dos horas, que en Mondomo el sismo del 6.6.94 causó múltiples daños a las viviendas, tanto en la zona urbana como en la rural.

Sin embargo, el sector más afectado, sin que sea claro el por qué, fue el barrio Belén ubicado al NNW de la población, en donde unas 45 casas sufrieron averías irreparables; la mayoría de ellas eran construcciones en adobe y bahareque (Foto 23). Las que quedaron en pie muestran techos colapsados y muros y pisos agrietados y desencajados. Las construcciones en bloque de cemento y de ladrillo, pero sin vigas de amarre y columnas de concreto resultaron también muy afectadas; sólo una de ellas, con amarres en las bases y en el techo resistió bien el sacudón (Foto 24). La iglesia del barrio, que durante el sismo de Popayán (1982) perdió las torres, experimentó esta vez agrietamientos y rupturas en las ventanas.

Así, pues, en la escala modificada de Mercalli, la intensidad del sismo en este lugar debió ser próxima a 8. Las personas mayores interrogadas afirman que el terremoto en cuestión fue el más fuerte hasta ahora vivido por ellas, y que durante el mismo, la tierra se movía en forma de olas, que era difícil mantener el equilibrio y que los objetos caían con facilidad; otros apreciaron también movimientos del suelo en forma de vaivén. No obstante, los efectos reales del sismo no pudieron ser apreciados de primera mano y con exactitud, pues a nuestra llegada (junio 20) ya casi todas las viviendas afectadas habían sido demolidas y se había emprendido la reconstrucción de las mismas. Mientras tanto, buena parte de los damnificados habitaban en carpas o galpones de madera y plástico; además, muchas viviendas averiadas en menor escala habían sido abandonadas (temporalmente) por temer a su caída, ya que las réplicas sísmicas, aunque suaves, continuaban a la fecha de la visita, creando un clima de incertidumbre en la población.

En resumen, de acuerdo con el censo del comité de emergencia, en la zona urbana y en las veredas circundantes, resultaron "133 casas afectadas, 112 averiadas y 21 destruidas"; no se registraron pérdidas humanas.

## 6. Recomendaciones

Dado que las observaciones aquí consignadas son producto de una visita efectiva de 4 días, y que no hubo tiempo para detallar los problemas arriba descritos, se recomendó:

- 1- Adelantar un estudio geomorfológico minucioso que permita definir mejor la extensión, número y alcance de los deslizamientos activos y potenciales en el área investigada, así como sus efectos en las construcciones, los cauces próximos y las zonas de cultivo.
- 2- A partir de dicho estudio, determinar los puntos apropiados para reubicar las viviendas y otro tipo de construcciones en peligro, o ya demolidas por los afectados, en el caso de que la localización actual sea inapropiada.
- 3- Establecer las soluciones ingenieriles o de reforestación, para la atenuación, mitigación o cura definitiva de algunos de los problemas de erosión regresiva o de deslizamientos potenciales, por mal manejo del suelo, exceso o mal trato de las aguas negras o servidas, o por la presencia de nacimientos de agua, que aquí son numerosos y empapan los suelos sensibles desarrollados en rocas piroclásticas.
- 4- Desarrollar un programa para la reconstrucción adecuada de las edificaciones afectadas por el terremoto del 6.6.94, teniendo en cuenta que, para seguridad y tranquilidad de la población, todas ellas deben tener algún tipo de diseño antisísmico. Además, puesto que la comunidad guambiana acostumbra a construir las viviendas por el sistema comunitario de "mingas", sería conveniente que se capacitara un número suficiente de personas en las técnicas de la construcción antisísmica, no necesariamente de costo elevado. Qué diseño o diseños adoptar, es un asunto a resolver conjuntamente entre pobladores, arquitectos e ingenieros.

## Agradecimientos

El autor reconoce la valiosa ayuda recibida por parte de la comunidad guambiana durante las labores de campo, y en especial el apoyo del gobernador del Cabildo, señor Segundo Tombé y a Felipe, nuestro incansable guía. Por el apoyo económico para los desplazamientos, a la Vicerrectoría de Recursos y al Centro de Prevención de Desastres de la Universidad Nacional, este último en cabeza de los doctores Rosalba Quintero y Omar Agudelo. Por la elaboración de los dibujos al señor José Miguel Rodríguez (Depto. Geociencias, Univ. Nal.). Por el procesamiento del texto a la señora Elcira de Mojica.

## Bibliografía

- Bolt, B.A.** 1981. Terremotos. Editorial Reverté, 266 pp., Barcelona.
- CERESIS.** 1985. Catálogo de terremotos para América del Sur. 4, 136 pp., Centr. Reg. Sismol. Am. Sur, Lima.
- Cuervo, E.** 1995. Armazón rombehédrica del ageología colombiana. Un modelo de evolución tectónica. Mem. VI Congr. Colombiano Petrol., T1, 71-78, Bogotá.
- Eslava, J.A.** 1993. Climatología y diversidad climática de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 18 (71): 507-538, Bogotá.
- Feininger, T.** 1981. Esquisto glaucofánico en Los Andes Colombianos cerca de Jambaló, Departamento del Cauca. III Congr. Col. Geol., resúmenes, p. 43, Medellín.
- Gómez, H.** 1986. Algunos aspectos neotectónicos hacia el suroeste del litoral surcolombiano. Revista CIAF, 11 (1-3): 281-298, Bogotá.
- INGEOMINAS.** 1988. Mapa geológico de Colombia, Esc. 1:1.500.000, Bogotá.
- INGEOMINAS/RSNC.** 1994. El Sismo de Páez (Cauca) del 6 de junio de 1994. Bol. Mens. Sismos. 2 (6), 13-26, Bogotá.
- INGEOMINAS.** 1995. El sismo del 6 de junio de 1994. En Mem. Semin. Sismotectónica en Colombia, marzo 23/95, Bogotá.
- Marín, P. & G. París.** 1979. Mapa geológico generalizado del Departamento del Cauca, escala 1:350.000. INGEOMINAS, Popayán/Bogotá.
- Mojica, J.** 1994. Evaluación de los daños causados por el terremoto del 6 de junio de 1994 en la región al oriente de Silvia, Cauca, Colombia. Inf. Téc. (Inéd.), 15 pp, Univ. Nal., Bogotá.
- , **Colmenares, F. Villarroel, C. Macía, C & M. Moreno.** 1985. Características del flujo de lodo ocurrido el 13 de noviembre de 1985 en el Valle de Armero (Tolima, Colombia). Historia y comentarios de los flujos de 1595 y 1845. Geol. Colombiana (14): 107-140, Bogotá.
- Nelson, H.W.** 1959. Contribution to the Geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali. Leidsche Meded. (22): 1-75, Leiden.
- Orrego, A.** 1982. Geología y Geoquímica del área mineralizada El Pismo, Silvia (Cauca, Colombia). Public. Geol. Esp. INGEOMINAS (10): 47-63, Bogotá.
- , **Cepeda, H. & G.I. Rodríguez.** 1980. Esquistos glaucofánicos en el área de Jambaló. Geol. Norandina (1): 5-10, Bogotá.
- Ramírez, J.E.** 1967. El macrosismo del Huila, macrosismo del 9 de febrero de 1967. Rev. Javeriana T67 (33): 323-333, Bogotá.
- . 1975. Historia de los terremotos en Colombia.- Inst. Geogr. Agustín Codazzi, 250 pp., Bogotá.
- Ujueta, G.** 1982. Lineamientos de dirección noroeste-sureste en la Cordillera Oriental colombiana (sector Girardot-Cúcuta) y en los Andes venezolanos. Trab. Prom. Prof. Titular, Inéd., 166 pp., Univ. Nal., Bogotá.
- West, R.C.** 1956. The Pacific Lowlands of Colombia. A negroid Area of the American Tropics. Monograph (8) 152 pp., Louisiana State University Press, Baton Rouge.

# NUEVA INFLACION Y RESTRICCIONES AL POTENCIAL EFECTIVO DE SU (5)

por

Alexis De Greiff<sup>1</sup> & Juan Manuel Tejeiro<sup>2</sup>

In Memoriam  
Otto de Greiff (1903-1995)

## Resumen

**De Greiff, A. & J.M. Tejeiro.:** Nueva inflación y restricciones al potencial efectivo de SU(5). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 93-109, 1996. ISSN 0370-3908.

En primer término, se hace una revisión detallada del modelo estándar de la cosmología y de sus principales problemas. A partir de la solución de Sitter se presenta el modelo inflacionario. Se muestra el cálculo de las cotas que impone la cosmología de la “nueva inflación” a los parámetros del potencial efectivo de Coleman-Weinberg para SU(5). Se encuentra que las restricciones más fuertes, i.e. las impuestas por las fluctuaciones de la densidad de energía, son comunes para los potenciales de la forma general  $\lambda\phi^4$ .

**Palabras claves:** Cosmología - inflación - radiación cósmica de fondo - potencial efectivo - física de Altas Energías - teorías de Gran Unificación.

## Abstract

We present a detailed review of the Standard Model of Cosmology and its main problems. Starting from the de Sitter solution, the Inflationary Model is introduced. We show the constraints that “New Inflation” imposes to the parameters of the SU(5) Coleman-Weinberg effective potential. It is found that the strongest constraint, i.e. energy density fluctuations, is common to the potentials of  $\lambda\phi^4$  type.

**Key words:** Cosmology - inflation - cosmic background radiation - effective potential - High Energy physics - Grand Unification theories.

## 1. Introducción

Desde que el modelo del Big Bang Caliente, donde el Universo tiene su origen en una singularidad con densidad de energía infinita, se constituyó en paradigma de las teorías acerca del Universo, las relaciones entre la astronomía y la

<sup>1</sup> Observatorio Astronómico Nacional, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Apartado Aéreo 2584, Bogotá, D.C. E-Mail: alegreif@ciencias.campus.unal.edu.co.

<sup>2</sup> Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C. E-Mail: jtejeiro@ciencias.campus.unal.edu.co.

física de altas energías se han estrechado cada vez más. Esta circunstancia obliga a pensar en la necesidad de que el modelo cosmológico y el de física de partículas sean consistentes, es decir que las pruebas experimentales de uno no contradiga las predicciones del otro.

En este artículo se expone de modo sistemático la relación entre las variables de cada uno de estos modelos, lo que ha implicado reunir en un solo texto material que se encuentra diluído en múltiples fuentes. El objetivo ha sido encontrar las cotas que imponen algunas mediciones de la astrofísica a los modelos de gran unificación del tipo  $\lambda\phi^4$ .

Para ello, hemos comenzado exponiendo en la Sección 2 los principales aspectos de la Teoría General de la Relatividad. Esto incluye una introducción a la ecuación de campo de Einstein, la métrica de Robertson-Walker, las ecuaciones de estado y finalmente las ecuaciones de Friedmann-Lemaître. En la Sección 3 mostramos los principales problemas que se presentan en la cosmología no inflacionaria, i.e. Planitud, Horizonte, Monopolos Magnéticos y Unicidad. De estos tres problemas, hemos hecho particular énfasis en el de horizonte y, más exactamente, en el cálculo del ángulo de separación de eventos, dado que si bien el resultado suele presentarse en muchos textos (Turner & Kolb, 1990; Börner, 1988), hasta el momento no hemos encontrado una deducción y completa. La Sección 4 pretende establecer la relación entre la energía del vacío y la "constante cosmológica". De esta manera en la Sección 5 se muestran los requisitos exigidos a la inflación para solucionar los problemas comentados en la Sección 3. Para dar un panorama completo de la evolución del modelo inflacionario, en la Sección 6 presentamos la primera propuesta, o "Vieja Inflación", así como sus principales inconvenientes. En la Sección 7 se encuentra el nuevo escenario y su relación con el Potencial Efectivo, lo que permite establecer el puente entre el modelo cosmológico y la física de partículas. Así pues, en la Sección 8 desarrollamos el potencial efectivo del tipo Coleman-Weinberg para el grupo de gran unificación SU(5). Para terminar en la Sección 9 hemos deducido las cotas a los parámetros del Potencial Efectivo dadas las de anisotropías de la Radiación Cósmica de Fondo. En la Sección 10 se encuentran las conclusiones.

Debemos señalar que la contribución de este artículo radica, por un lado, en reunir un material disperso y desordenado, presentando de manera ordenada el modelo inflacionario y algunas relaciones entre física de altas energías y astrofísica. De otro lado, en este estudio hemos llegado a la conclusión que todos los modelos del tipo  $\lambda\phi^4$  comparten el inconveniente de predecir fluctuaciones en la densidad de energía mucho más grandes que las evidenciadas a través de las mediciones de la Radiación Cósmica de Fondo. Este hecho obliga a pensar en otras alternativas no sólo para los

modelos de gran unificación, sino para el mismo Big Bang Caliente.

## 2. Dinámica de la cosmología moderna

El punto de partida de la cosmología moderna es la ecuación de campo de Einstein<sup>1</sup>:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} \quad (2.1)$$

donde  $R_{\mu\nu}$  es el tensor de Ricci,  $R$  es el escalar de Ricci,  $g_{\mu\nu}$  el tensor métrico,  $T_{\mu\nu}$  el tensor momentum-energía,  $G^{-1/2} \approx 1.2 \times 10^{19}$  GeV es el inverso de  $M_P$  (la masa de Planck) y  $\Lambda$  la "constante cosmológica" o energía del vacío. Esta ecuación implica que la distribución de la materia determina la forma y evolución del Espacio-Tiempo (E-T) que la contiene y viceversa.

Dado que esta ecuación es de carácter general, es necesario imponer ciertos requisitos con el fin de poder ponerla en términos de parámetros medibles y buscarle soluciones que puedan ser contrastadas con las evidencias experimentales.

Asumiendo como válido el "principio cosmológico", i.e. homogeneidad e isotropía, la métrica máximamente simétrica, y en consecuencia más apropiada para nuestra descripción, es la de Robertson-Walker (R-W):

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left( \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right) \quad (2.2)$$

donde hemos utilizado la convención de signo de Landau y Lifshitz (1966), i.e.  $ds^2 = dt^2 - dx^2$ , y ha sido escrita en términos de las coordenadas comovientes  $(r, \theta, \phi)$ ;  $R(t)$  es el factor de escala y  $k$  una constante que por como se ha definido  $r$  sólo puede tomar los valores 1, -1 y 0 (para una discusión detallada ver Misner *et al.*, 1973).

En cuanto al tensor momentum-energía, supondremos que los campos de materia los podemos describir como un fluido perfecto isotrópico y homogéneo; entonces

$$T_{\nu}^{\mu} = (\rho, -p, -p, -p) \quad (2.3)$$

<sup>1</sup> A menos de que se indique lo contrario, utilizaremos "Unidades Naturales", i.e.  $c = \hbar/2\pi = k = 1$ . Igualmente usamos el subíndice 0 para referirnos a valores actuales de las variables.

con  $r$  la densidad de energía y  $p$  la presión o densidad de momentum.

Si aplicamos la ecuación de continuidad,  $T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0$  (el punto y coma aquí es derivada covariante), para  $\mu = 0$  obtenemos que la conservación de la energía implica

$$d(\rho R^3) = -p d(R^3) \quad (2.4)$$

i.e. la primera ley de la termodinámica siendo  $R$  el "radio del Universo"<sup>2</sup>.

Por último, debemos caracterizar el tipo de fluido por una ecuación de estado, es decir una relación entre  $\rho$  y  $p$ . Para nuestros fines, la supondremos de la forma general

$$p = \omega \rho \quad (2.5)$$

con el único requisito de que  $\omega$  sea una constante independiente del tiempo que especifica si la energía del sistema está dominada por partículas relativistas/radiación ( $\omega=1/3$ ), por campos gravitacionales/materia ( $\omega=0$ ) o por la energía del vacío ( $\omega=-1$ ).

Si introducimos (2.5) en (2.4) e integramos, tenemos que

$$\rho \propto R^{-3(1+\omega)} \quad (2.6)$$

Así pues, las etapas del Universo corresponden a una fase primigenia dominada por la radiación y una fase tardía (hoy), en ausencia de  $\Lambda$ , dominada por materia. El caso de dominio del vacío corresponde a la fase inflacionaria, como veremos.

Una ventaja de utilizar la ecuación de estado de la forma (2.5), es que nos permite describir el Universo en términos de un solo parámetro:  $R(t)$ . Para hacer esto, construimos el tensor y el escalar de Ricci, utilizando la métrica de R-W (ec. 2.2). Si introducimos el resultado en (2.1), con (2.3) obtenemos que para  $\mu=\nu=0$

$$H^2 + \frac{k}{R^2} = \frac{8\pi}{3M_p^2} \rho + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.7),$$

donde  $H = \frac{\dot{R}}{R}$ , el parámetro<sup>3</sup> de Hubble; mientras que para la componente  $i-i$ :

$$H^2 + \frac{k}{R^2} = \frac{8\pi}{3M_p^2} \rho + \frac{\Lambda}{3} \quad (2.8).$$

Estas ecuaciones constituyen las ecuaciones de Friedmann-Lemaître (F-L) y, junto con (2.4) son las herramientas necesarias para la descripción de nuestro sistema. Sin embargo, estas tres ecuaciones no son independientes ya que están acopladas a través de las identidades de Bianchi, luego sólo dos de ellas lo son. Lo más apropiado es utilizar (2.4) y escoger (2.7) entre las ecuaciones de F-L dado que, a diferencia de (2.8), es una ecuación de primer orden.

De otro lado, si dividimos (2.8) por  $H^2$ , para  $\Lambda=0$  se tiene

$$\frac{k}{H^2 R^2} = \Omega - 1 \quad (2.9),$$

donde  $\Omega = \rho/\rho_c$  y  $\rho_c = 3H^2/8\pi G$  es la densidad crítica. Lo que implica que el Universo es cerrado ( $k = +1$ ) si  $\Omega > 1$ , plano ( $k = 0$ ) si  $\Omega = 1$  o abierto ( $k = -1$ ) si  $\Omega < 1$ .

El parámetro de Hubble es una medida del lapso de tiempo (propio) durante el cual hay algún tipo de dominio particular. Este es un punto fundamental y se puede ver si definimos este tiempo de la manera siguiente:

$$t = \int_0^{R(t)} \frac{dR}{R} \quad (2.10),$$

en cuyo caso tenemos en general (ver Turner & Kolb, 1990)

$$t \propto H^{-1} \quad (2.11).$$

Además podemos ver que si  $\Omega = 1$ ,

$$H^2 \propto \frac{\rho}{M_p^2} \quad (2.12)$$

y, en consecuencia,

$$R(t) \propto t^{\frac{2(1+\omega)}{3}} \quad (2.13)$$

para el caso de dominio de materia y de radiación.

Tomemos ahora el caso que mayormente nos interesará: el del dominio de vacío, i.e.  $T_{\mu\nu} = 0$ ; luego, integrando la ecuación de F-L se obtiene

$$t = \left(\frac{\Lambda}{3}\right)^{-1/2} \arccos h(R) \quad (2.15);$$

<sup>2</sup> Esta identificación es estrictamente válida únicamente para el caso bidimensional con curvatura positiva, i.e.  $S^2$ .

<sup>3</sup> La denominación constante de Hubble es incorrecta a la luz de su definición, por cuanto aunque es constante en el espacio, obviamente no lo es en el tiempo.

lo que para  $k=0$  se reduce a

$$R(t) \propto \exp[Ht] \quad (2.16)$$

y, en consecuencia, el Universo se expande muy rápidamente durante un tiempo propio característico  $\tau = H^{-1}$ . Es posible verificar que este resultado es consistente con tener una presión negativa (!), i.e.  $\omega = -1$  en (2.5). A esta época la llamamos inflacionaria y la métrica con estas características fue introducida por el astrónomo holandés Wilhelm de Sitter en 1917.

### 3. Problemas de la cosmología estándar no inflacionaria

El éxito del modelo estándar de la cosmología, o "Modelo del Big Bang Caliente", se puede remitir a la explicación de las siguientes evidencias observacionales: (1) RCF con una temperatura de aproximadamente 2.7K, isotrópica hasta  $\alpha(10^{-5})$  en  $\Delta T/T$ ; (2) expansión universal (flujo de galaxias de Hubble); (3) abundancia de elementos livianos (H:He: todos los otros elementos = 2500:450:8). Sin embargo este modelo presenta serios problemas que motivan el planteamiento de la fase inflacionaria. A éstos suele llamarse problemas de "Suficiente Inflación".

*a. El problema de planitud o de entropía.* Si bien la métrica de R-W no posee vectores de Killing como de tiempo, en buena aproximación podemos hablar de un equilibrio térmico a nivel local en el Universo. Adicionalmente, las mediciones del espectro de Radiación Cósmica de Fondo (RCF) evidencian un comportamiento planckiano de esta radiación (Mather *et al.*, 1990) que validan nuestra suposición de que el Universo ha estado en equilibrio térmico (para una revisión ver De Greiff, 1992: Apéndice A).

En consecuencia, podemos calcular la densidad de entropía en función de la temperatura:

$$s = \frac{2\pi^2}{45} g_s(T) T^3 \quad (3.1)$$

donde  $g_s(T) = \sum_B g_B \left(\frac{T_B}{T}\right)^3 + \frac{7}{8} \sum_F g_F \left(\frac{T_F}{T}\right)^3$ , i.e. la contribución de grados de libertad espinoriales tanto de bosones como de fermiones (el 7/8 se debe a la diferencia entre la estadística bosónica y fermiónica).

Teniendo en cuenta que las partículas que contribuyen de manera significativa en el cálculo de  $g_s(T)$  hoy (dentro de un modelo de partículas no exóticas), son las tres especies de

neutrinos y los fotones, y que el cociente de la temperatura de los primeros con respecto a los segundos es  $\left(\frac{T_\nu}{T_\gamma}\right)_0 = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3}$ , se puede hacer un estimativo de la densidad actual de entropía por volumen comoviente a partir de  $T_\gamma \approx 2.73K$ :

$$s_0 \approx \left(\frac{2\pi^2}{45}\right) (3.90)(2.73) \approx 2800 \text{cm}^{-3}$$

Dado que la entropía dentro de un volumen comoviente (tamaño físico al cubo del horizonte) es

$$S_0 = s_0 d_H^3 \quad (3.2)$$

donde  $d_H$  es la distancia física al horizonte (intervalo como de luz), y que

$$d_H(t_0) = 2ct_0 = \frac{2c}{H_0} \approx 12000 \text{Mpc} \approx 10^{28} \text{cm}$$

tomando  $H_0 = 50 \text{Km/s.Mpc}$  (Tammann, 1994) obtiene

$$S_0 = 10^{88}$$

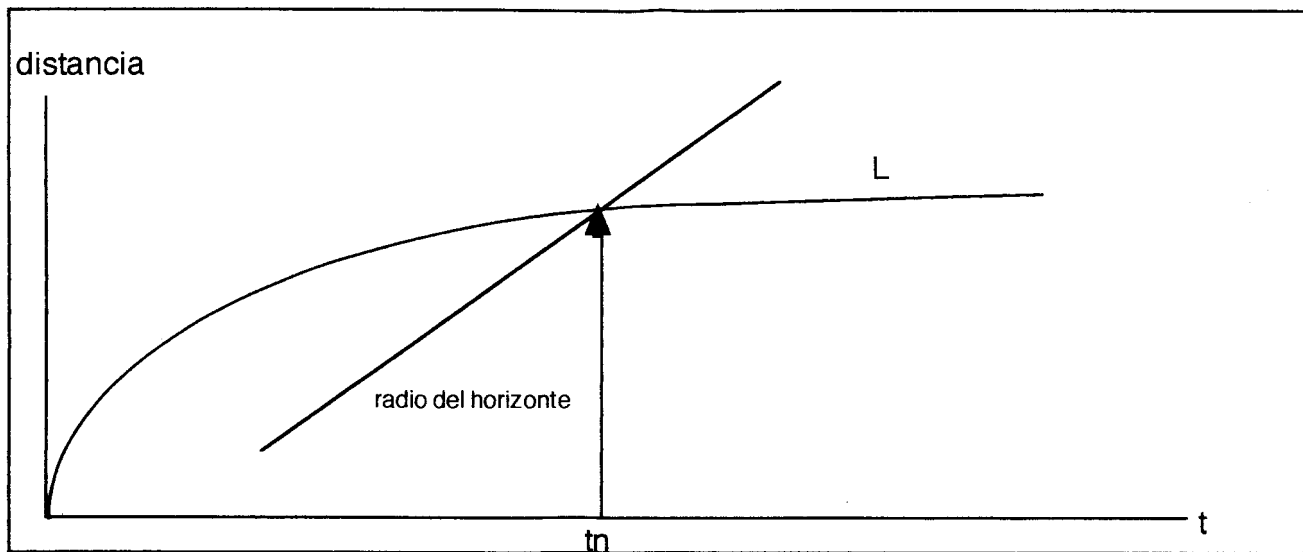
Ahora bien, nuestra estructura a gran escala y el espectro de RCF parecen evidenciar que hemos sufrido una expansión adiabática, por consiguiente el valor actual de la entropía es una *condición inicial* de nuestro Universo, i.e. el problema de entropía. Además, la condición de 'adiabaticidad' implica que  $R_0 T_0 = RT$ , por lo que, dado que la densidad de energía viene dada por la ley de Stephan-Boltzmann, i.e.  $\rho \propto T^4$ , podemos reescribir la ecuación de F-L en términos de  $S$  y de  $T$ ,

$$H^2 = \frac{4\pi^3}{45} g(T) \frac{T^4}{M_p^2} - \frac{k}{S^{2/3}} \left(\frac{2\pi^2}{45}\right)^{2/3} g(T)^{2/3} T^2;$$

donde usamos la condición  $dS = 0$ ; luego, utilizando la definición de (2.9), obtenemos

$$\frac{|1-\Omega|}{\Omega} = \frac{90}{8\pi^3} \left(\frac{2\pi^2}{45}\right)^{2/3} g(T)^{-1/3} S^{-2/3} \left(\frac{M_p}{T}\right)^2 \quad (3.3)$$

Esto implica que  $R_0 T_0 = RT$  varía de  $10^{-15}$  a  $10^{-49}$  cuando la temperatura pasa de los MeV a  $10^{14}$  GeV, i.e.  $\Omega \approx 1$  siempre, dado el valor tan grande de  $S$ . Por ésto el problema del valor inicial de la entropía es equivalente al problema de planitud: ambos problemas se refieren a las condiciones iniciales que requiere el modelo estándar no inflacionario para dar cuenta de un valor tan grande de la entropía hoy.



**Figura 1.** En algún momento durante el Universo primigenio el radio del horizonte es menor a la distancia entre puntos que, de acuerdo con la isotropía de la RCF, debieron estar en contacto causal.

*b. El problema del horizonte o de isotropía.* Según los experimentos realizados bien sea en tierra, globos y satélites, la RCF es isótropa hasta un nivel de  $30\mu\text{K}$ , en escalas angulares que van de  $0.5^\circ$  a  $90^\circ$ . Sin embargo, mientras  $d_H \propto 2t$ , la distancia a un punto cualquiera que, en el tiempo  $t$  entra a nuestra región del Universo observable,  $L = L_0 \frac{R(t)}{R_0} \approx \sqrt{t}$ .

Por consiguiente, tendremos lo que se muestra en la figura 1, i.e. regiones que hoy se encuentran dentro de una región causalmente conectada no estuvieron en contacto causal en etapas tempranas del Universo, cuando debió producirse la termalización isotrópica que hoy observamos.

Para ver esto de forma explícita, es oportuno hacer el cálculo del ángulo de separación correspondiente a regiones causalmente conectadas en el momento de desacople radiación-materia.

<sup>4</sup> Un punto importante es que el factor  $R(t)$  juega las veces de "escalador espacial" de distancias físicas, es decir, si para  $t=t_1$  la distancia física entre dos puntos es  $l(t_1)$ , entonces en un tiempo posterior  $t=t_0$  su distancia física será  $l(t_0) = R(t_0) l(t_1)$ .

Una consecuencia de lo anterior es que el cociente entre las longitudes de onda de un fotón emitido en  $t=t_1$  y recibido en  $t=t_0$  viene dado por

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{R(t_0)}{R(t_1)} = 1+z$$

que define el factor de corrimiento al rojo  $z$  y de donde se sigue la ley de Hubble.

Utilizando la relación entre el radio coordenado de un punto,  $r$ , y su correspondiente corrimiento al rojo  $z^4$

$$r_0 \int_{r_1}^{\dots} \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}} = \int_{R_1}^{R_0} \frac{dR(t')}{R(t')R(t')}$$

se obtiene, para  $k=0$  ( $\Omega=1$ ),

$$\int_{r_e}^{r_0} dr_1 = \int_{z_e}^{z_0} \frac{dz}{R_0 H_0 (1+z)^{3/2}} \tag{3.4}$$

siendo  $r_e$  la coordenada del emisor y  $r_0$  la del receptor. Con las condiciones  $r_e=0, z_e=0$  y  $r_0=r_0, z_0=z$ , y calculando la distancia física al objeto hoy ( $t=t_0$ ), i.e multiplicando por el factor de escala  $R_0$  (y con  $c \neq 1$ ), se obtiene de (3.4)

$$cR_0 r_0 \approx d_0 = d_H \left[ 1 - (1+z)^{-1/2} \right],$$

donde  $d_H = 2cH^{-1}$  es la distancia al horizonte.

Para estimar el ángulo subtendido por un objeto con radio  $a$  (en el momento de emisión), a una distancia física  $d_e$  (cuando el objeto atravesó el cono de luz), se tiene

$$\theta = \frac{2a}{d_e} \tag{3.5}$$

Pero, existe una relación entre  $d_e$  y  $d_0$  fijada precisamente por el corrimiento al rojo  $(1+z)$ :

$$d_e = \frac{d_0}{(1+z)} \quad (3.6)$$

Sin embargo,  $d_e$  como tal no es una distancia medible directamente. Para calcular distancias físicas medibles directamente, debemos remontarnos a un método astronómico e introducir la llamada "distancia de luminosidad": si escribimos el flujo de energía por unidad de área,  $F$ , emitida por un objeto,

$$F = \frac{L}{4\pi D^2} \quad (3.7)$$

donde  $L$  es la luminosidad absoluta, i.e. energía por unidad de tiempo, y  $D$  la distancia al objeto. Para espacios de R-W, el área está dada por  $4\pi r^2 R(t_0)^2$ . Además, durante el intervalo temporal  $\Delta$ , la energía total emitida es  $\Delta.L$ , pero por el corrimiento al rojo  $\Delta_{emitido} \rightarrow \Delta_{recibido} = (1+z)\Delta_{emitido}$ ; concomitantemente, la frecuencia se reduce en el mismo factor. En consecuencia, la ecuación (3.7) debe ser corregida:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2 R(T_0)^2 (1+z)^2}$$

con lo que

$$D(z) = r_0 R(t_0)(1+z) = d_0(1+z) \quad (3.8)$$

Si comparamos (3.8) con (3.6),

$$d_e = D(z)(1+z)^{-2}$$

por lo que la relación (3.5) queda

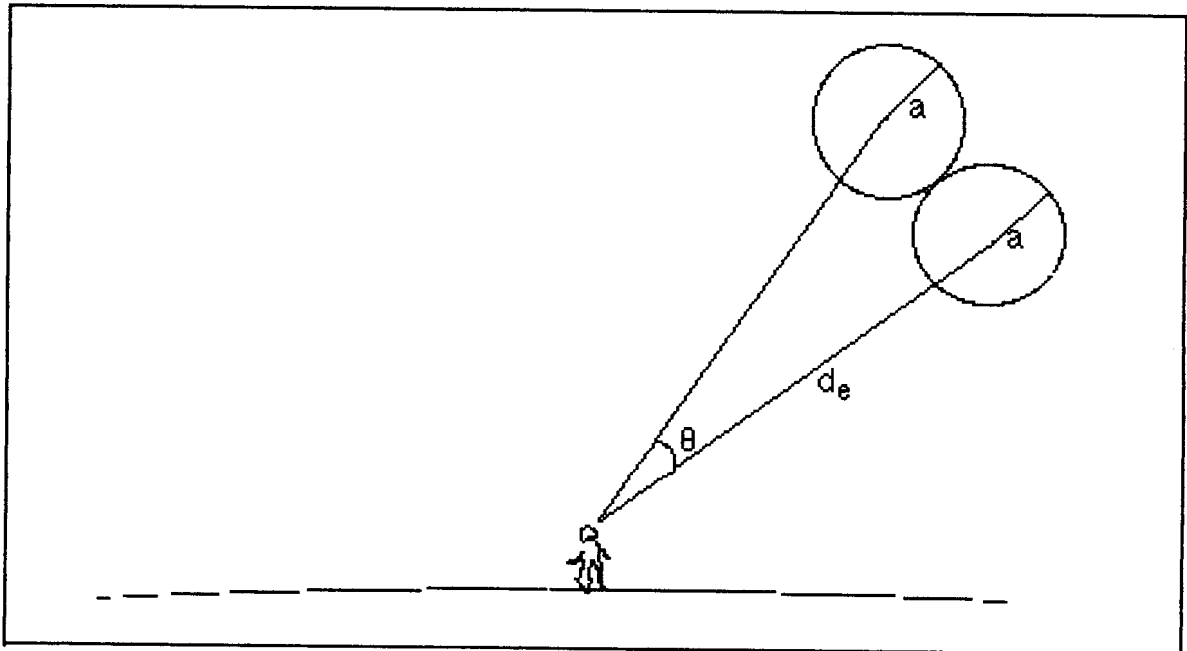
$$\theta = \frac{2a}{D(z)}(1+z)^2 \quad (3.9)$$

siendo

$$D(z) = 2H_0^{-1} \left[ (1+z) - (1+z)^{1/2} \right]$$

Por último,  $a$  se puede estimar como  $2ct_d$  con lo que finalmente la distancia angular requerida para el momento de desacople es (con:  $(1+z_d) \approx 1100$ ,  $t_d = 4.39 \times 10^{12} s$ ,  $H_0^{-1} = 3.0856 \times 10^{17} s$ )

$$\theta = \frac{t_d}{H_0^{-1}} \left[ (1+z_d) - (1+z_d)^{1/2} \right]^{-1} (1+z_d)^2 \approx 0.8^\circ \quad (3.10);$$



**Figura 2.** En el modelo estándar no inflacionario, dos puntos separados una distancia angular mayor a  $0.8^\circ$  no habrían estado en contacto causal, de modo que sus temperaturas deberían ser muy diferentes; sin embargo, la RCF es isotrópica.  $d_e$  es aquí la distancia correspondiente al momento de nucleosíntesis y a la distancia del horizonte de los puntos en ese mismo momento.



esto significa que, dado que la distancia de Hubble en el momento de desacople subtende un arco máximo de  $0.8^\circ$ , no debería haber correlación de temperaturas entre puntos separados una distancia angular mayor como se muestra en la figura 2.

Como se ve, regiones que hoy se encuentran dentro de nuestro radio del horizonte estuvieron causalmente desconectadas entre sí en épocas tempranas; no obstante, la RCF es isótropa en al menos una parte en  $10^5$  (Smoot, 1992) en todas las direcciones. Si comparamos el valor de la entropía en un radio del horizonte hoy y en el momento de recombinación,  $t_n$ , entonces en nuestro volumen de Hubble debe haber  $10^5$  regiones desconectadas, lo que significa que dado que la distancia de Hubble en el momento de recombinación subtende un arco máximo de  $0.8^\circ$ , no debería haber correlación de temperaturas de puntos separados una distancia angular mayor.

c. *El problema de monopolos magnéticos*. Las Teorías de Gran Unificación (TGU) contienen, dentro de su espectro de partículas, monopolos magnéticos del tipo predicho por 't'Hooft (1974) y por Polyakov (1974) de masas muy grandes ( $M_m \approx M_X / \alpha \approx 10^{17}$  donde  $M_X$  es la masa del bosón X y  $\alpha$  la constante de acople de gran unificación).

Estos "objetos" son topológicamente estables y su tasa de producción se da íntimamente relacionada con la transición de fase que permite el Rompimiento Espontáneo de Simetría (RES) (Nanopoulos, 1983).

Podemos escribir la densidad de monopolos producidos en TGU como (Ellis, 1978)

$$(n_m)_{T_c} \approx \frac{1}{(\xi_c)^3}$$

donde  $\xi_c$  es la longitud de correlación del campo Higgs (responsable del RES) a la temperatura crítica  $T_c$ . Dado que  $\xi_c \leq ct_c$ , la distancia al horizonte, y con un estimativo del tiempo crítico característico,  $t_c \approx M_p / T_c^2$ , se tiene que teóricamente

$$\left( \frac{n_m}{n_\gamma} \right)_0 \geq \alpha (10^{-10}). \quad (3.11)$$

Sin embargo, dado que la proporción total de monopolos no puede ser mayor a la de materia bariónica,

$$n_m M_m \leq \alpha (n_B m_B)$$

siendo  $n_B$  y  $m_B$  la densidad y la masa de bariones respectivamente, tenemos que (Nanopoulos, 1983)

$$\left( \frac{n_m}{n_\gamma} \right)_0 \leq \frac{m_B n_B}{M_m n_{\gamma 0}} \approx 10^{-17} 10^{-10} \approx 10^{-27} \quad (3.12)$$

lo que claramente muestra una preocupante discrepancia (ec. 3.11 y 3.12) de 17 órdenes de magnitud entre la predicción teórica y la cota experimental.

d. *El problema de la Unicidad del Universo*. Esta es probablemente la cuestión más profunda a la cual aspira dar respuesta la física teórica y se refiere al esfuerzo por explicar por qué es el Universo tal como se presenta a nivel de lo que vemos, i.e. como nuestros instrumentos lo miden.

Este problema se refiere, en su versión más débil, al valor de las "Constantes Universales" (G, c, h,  $\alpha$ , etc.) que puedan predecir las teorías de renormalización para espacios curvos, i.e. donde los efectos gravitacionales son importantes ( $T \approx M_p \approx 10^{19}$  GeV). La pregunta de fondo es entonces ¿Por qué son los valores experimentales de las "Constantes Universales" precisamente esos?

Sin embargo hay cuestiones aún más profundas por ser explicadas. Por ejemplo, en teorías con  $\text{dim} > 4$  (entre las cuales se enmarcan las de supercuerdas), e.g.  $\text{dim} = 10$ , donde el proceso de reducción de dimensiones se realiza a través de compactificación, el resultado final  $\text{dim} = 4$  no es único. Son posibles modelos con otras dimensiones. Entonces ¿Por qué nuestro Universo es de cuatro dimensiones?

El problema mayormente aludido en la literatura, relacionado con la Unicidad del Universo, se refiere al hecho de que, en la ecuación de campo de Einstein, la transformación  $T_{\mu\nu} \rightarrow T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$  no altera la invariancia de las ecuaciones por cuanto la derivada covariante de  $g_{\mu\nu}$  es siempre cero. Sin embargo, el valor experimental estimado para la constante  $\Lambda$  es prácticamente. ¿Por qué esta constante fundamental es exacta o prácticamente cero? Ese es el "Problema de la Constante Cosmológica".

Similarmente, se puede preguntar por qué la simetría de bajas temperaturas (hoy) corresponde al grupo  $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ , si bien es sabido que el proceso de ruptura de simetrías no es único; por ejemplo,  $SU(5)$  puede romperse en  $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ , i.e. el modelo electrodébil; pero también es posible que antes pase por un vacío intermedio con simetría  $SU(4) \otimes U(1)$  (Nanopoulos, 1983).

#### 4. La energía del vacío y la constante cosmológica

Hasta el momento nos hemos referido a  $\Lambda$  como una constante que, si se introduce dentro de las ecuaciones de F-L, el factor de

escala  $R(T)$  crece exponencialmente. Además, podemos ver que este crecimiento es consistente con  $\omega = -1$  en la ecuación de estado, i.e.  $\Lambda$  actúa como una presión negativa, lo que implica que la densidad de energía  $\rho$  permanece constante (2.6). Cómo se justifica la introducción de dicha constante y el significado que se le asigna es la cuestión que sigue.

La idea central es suponer que el Universo ha pasado a lo largo de su "historia" por una serie de estados, cada uno caracterizado por un tipo de simetría particular que determina el tipo de interacciones admitidas en el sistema. El parámetro clave es la energía del mismo y el paso de un tipo de simetría a otra se da a través de un RES (para una revisión ver **Bailin & Love, 1986**). Podemos esquematizar la evolución así:

$$G \longrightarrow G_n \longrightarrow \dots \longrightarrow G_0$$

$$\begin{array}{ccccccc} & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ & & M_n & & M_{n-1} & & M_0 \end{array}$$

donde  $G_0$  es el grupo de simetría actual y  $G$  el "grupo original";  $M_i$  es la escala de energía a la cual se rompe la simetría  $i+1$ -ésima, y corresponde básicamente a la masa de los bosones intermediarios de las nuevas interacción. A partir

de la unificación de las interacciones electromagnética y débil (**Weinberg, 1967; Salam, 1968; Glashow, 1958**), sabemos que  $G_1 = SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  y que  $G_0 = SU(3)_C \otimes U(1)_{E.M.}$  de tal modo que  $c$  hace referencia a la fuerza fuerte (cromodinámica cuántica) y  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  describe la interacción electrodébil. La escala de energía es del orden de la masa del bosón  $W$ , i.e.  $M_W \approx 100$  GeV.

Bajo la suposición de que a escalas de energía más altas de la actual se restaura un tipo de simetría "más fundamental", se asume que existe un grupo  $G$  donde sólo existe un tipo de interacción y, por consiguiente, una sola constante de acople. Estos modelos son justamente los que se llaman Teorías de Gran Unificación (TGU).

El RES está basado en el mecanismo de Higgs (**Bailin & Love, 1986**), donde se supone la existencia de un campo (el campo Higgs) que, en la fase de mayor simetría, tiene un valor esperado del vacío igual a cero,  $\langle \phi \rangle = 0$ . Este campo está sometido a un Potencial Efectivo (PE) que tiene como característica fundamental que depende de la temperatura tal y como se muestra en la figura 3.

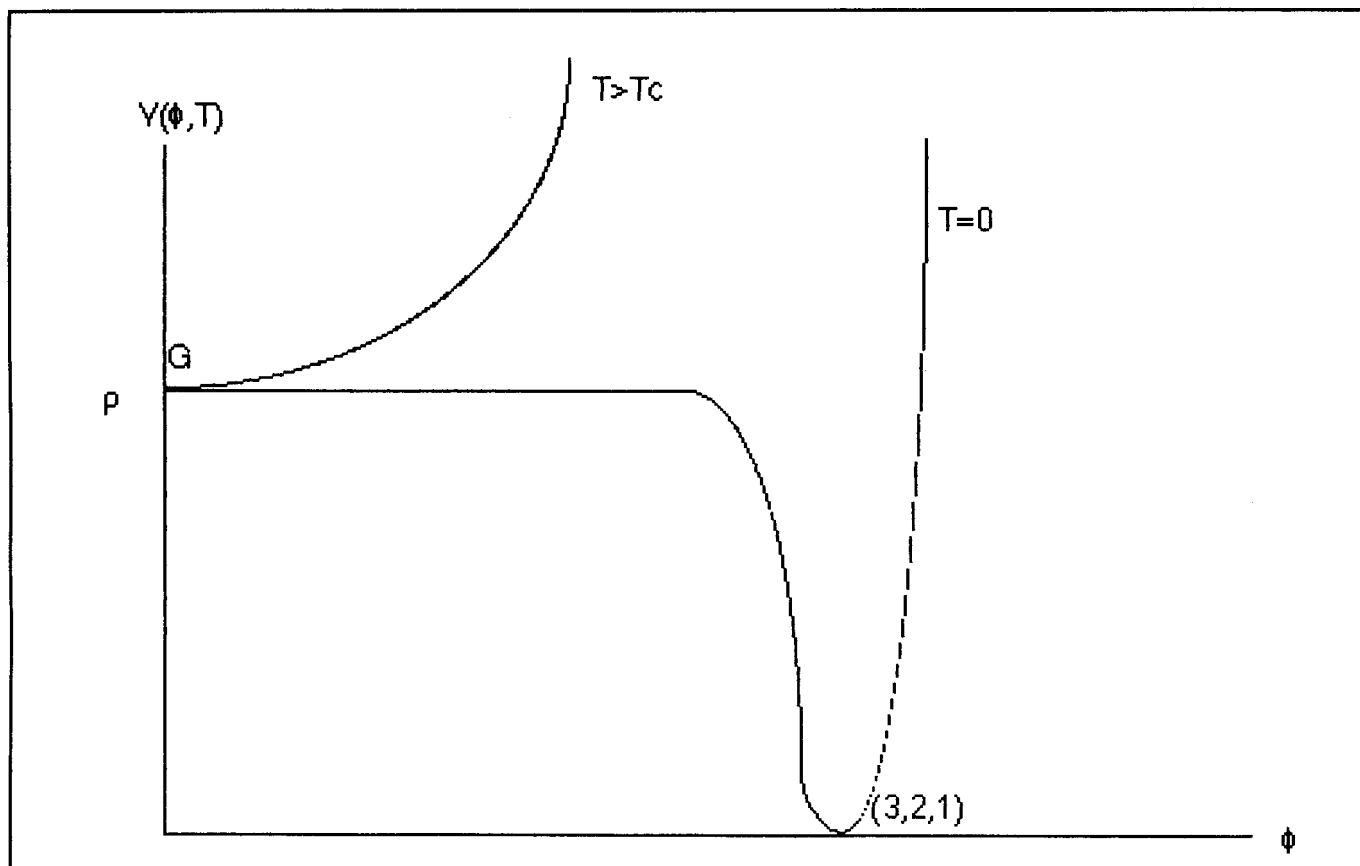


Figura 3. Potencial efectivo del campo Higgs.

Así pues, para temperaturas muy altas  $\langle \phi \rangle = 0$  (simetría G) es estable, mientras que, cuando la temperatura alcanza un valor crítico  $T_c$  (escala de energía para RES), el sistema presenta dos mínimos estables; finalmente, cuando  $T < T_c$ ,  $\sigma \neq 0$  es el mínimo global mientras que cero es un mínimo local. Ya que el sistema tiende al mínimo estado de energía, cuando la temperatura desciende hasta  $T < T_c$ , se instaura una nueva simetría.

La adquisición de un valor esperado del vacío distinto de cero implica un RES por cuanto las partículas intermediarias de las posibles interacciones bajo la nueva simetría adquieren una masa proporcional a  $g\langle \phi \rangle$  ( $g$  la constante de acople), i.e. aparece un nuevo tipo de interacción mediado por estos "nuevos bosones masivos".

La naturaleza misma del campo Higgs se desconoce, pero el punto central aquí es que el valor esperado del vacío es cero cuando el grupo de simetría es G, y cuando  $\langle \phi \rangle = \sigma \neq 0$  la simetría se rompe al nuevo grupo  $G_n$ .

Como ya se ha señalado, la escala de energía para el modelo electrodébil es  $\alpha(100\text{GeV})$ . En principio, para el caso de TGU, puede ser cualquiera, sin embargo dado que para energías superiores a la masa de Planck los efectos gravitacionales pueden ser significativos y que en este contexto no pretendemos unificar esta interacción, supondremos que  $M < M_p$ .

La cota inferior de  $M$  viene dada por la masa de los bosones intermediarios de la nueva simetría; si admitimos un rompimiento de la forma

$$G \longrightarrow SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \longrightarrow SU(3)_C \otimes U(1)_{E.M.} \quad (4.1)$$

entonces, según el grupo de renormalización,  $M \approx M_X \approx \alpha(10^{15})$  (ver **Halzen & Martin**, 1983), donde  $M_X$  es la masa de los bosones X e Y encargados de producir barigénesis por decaimientos de quarks.

En este modelo debemos notar que mientras  $\langle \phi \rangle = 0$  no hay campos de materia presentes, luego la única contribución proviene de la energía del vacío contenida en el PE del campo Higgs. Entonces hacemos la asignación

$$\langle 0 | T_{\mu\nu} | 0 \rangle = \Lambda g_{\mu\nu} \quad (4.2)$$

y

$$\Lambda \approx \frac{8\pi}{M_p^2} V(\phi=0) \approx \alpha \left( \frac{T_c^4}{M_p^2} \right) \quad (4.3),$$

donde  $|0\rangle$  es el estado de vacío; para la segunda igualdad hemos hecho uso de  $\rho \approx V(0) \approx T^4$  (ley de Stephan-Boltzmann).

Debemos recalcar que la transformación  $T_{\mu\nu} \longrightarrow T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$  no viola la covariancia de las ecuaciones y por consiguiente tampoco la ley de conservación (2.4), de manera que aunque nosotros hemos introducido la contribución del vacío en un término independiente en (2.1), estrictamente puede incorporarse dentro del tensor momentum-energía, teniendo en cuenta que los efectos cuánticos son significativos para las contribuciones de punto cero.

Por último es necesario recordar que la existencia de una energía del vacío no sólo permite introducir un "marco natural" para el RES, sus efectos han sido medidos en otros sistemas, e.g. efecto Cassimir, (**Aitchinson**, 1985).

## 5. Solución a los problemas de "Suficiente Inflación": primeros requisitos

Hasta aquí el panorama es el siguiente: por un lado es posible, a través de la introducción de  $\Lambda$  en las ecuaciones de Einstein, producir una expansión exponencial del Universo (ec. 2.15-2.16); del otro, se tiene que el Universo da evidencia de ser plano, isótropo y con ausencia de monopolos magnéticos (al menos hasta límites muy cercanos a cero). La pregunta es entonces ¿un crecimiento fuertemente acelerado del factor de escala proporciona un Universo como el que observamos? ¿Es posible, a través de la incorporación de una energía del vacío, hacerle frente a los problemas de la cosmología estándar (Sección 3)?

La respuesta es, en principio, sí; pero se deben imponer algunas condiciones a esta expansión. Para entender este punto es necesario que entendamos el proceso de RES como una transición de fase de un sistema termodinámico. En el caso de nuestro sistema particular, el parámetro de orden es el valor esperado del campo Higgs ( $\langle \phi \rangle$ ) y la energía libre es el PE.

Por lo descrito en párrafos anteriores, cuando  $T < T_c$  el valor esperado del campo es  $\sigma$  y por consiguiente la transición de fase se produce. Al mismo tiempo, mientras la configuración energética del Universo se encuentra en el falso vacío, la métrica viene dada por la de de Sitter. Este crecimiento exponencial implica un super-enfriamiento del sistema ya que  $T \propto R^{-1}$ .

Sin embargo, dado que se ha producido una transición de fase, la energía almacenada en el PE ha de convertirse en calor latente que se libera una vez el sistema entra en la nueva fase (simetría). La liberación de este calor latente recalienta el Universo hasta una temperatura del orden de la temperatura

crítica, i.e. termodinámicamente, una vez termina la superexpansión (super-enfriación) comienza un proceso de recalentamiento de  $T = 0$  a  $T \approx T_c$ , lo que conlleva a un aumento de la entropía en un factor igual al de la expansión, i.e. el recalentamiento no es un proceso adiabático, lo que es clave para la solución de los problemas enunciados:

$$(R_0^3 s_0) = Z^3 (R^3 s) \quad (5.1)$$

donde

$$Z = \frac{R(t_f)}{R(t_c)} \quad (5.2)$$

con  $t_c$  el instante en que comienza la inflación y  $t_f$  en el que termina, de modo que la densidad entropía por volumen comoviente es constante.

El punto fundamental ahora es determinar qué valor debe tomar  $Z$  en (5.2) para cumplir con los requisitos que imponen los problemas referidos a Suficiente Inflación.

a. *El problema de planitud o de entropía*. De acuerdo con (3.1), (3.2) y con un estimativo del radio del horizonte  $\alpha(H^{-1})$ , cuando la inflación empieza, el valor de la entropía dentro de una región causalmente conectada es

$$S_i = T_c^3 (H^{-1})^3 \approx 10^{14}$$

i.e.  $S_i = S_0$ ; durante el proceso de recalentamiento (5.1) es válida y, en consecuencia

$$S_f = Z^3 \alpha(10^{14}) = (\exp(H\Delta t))^3 \alpha(10^{14})$$

Entonces,

$$H\Delta t = N \approx 60 \quad (5.3)$$

es suficiente para solucionar el problema de la entropía, i.e.  $S_f = S_0 \approx 10^{88}$ .

Además usando la ecuación de F-L (ecs. 2.12 y 4.2-4.3),

$$H \approx \sqrt{\Lambda} \approx \frac{\rho}{M_p}$$

con  $\rho$  la densidad de energía del vacío, y además la ley de Stephan-Boltzmann, la duración de la fase inflacionaria debe ser

$$\Delta t \approx \frac{M_p}{T_c^2} 60 \approx 10^{-9} (\text{GeV})^{-1} \approx 10^{-35} \text{ s} \quad (5.4)$$

$$\text{para } T_c = 10^{14} \text{ GeV}^5.$$

b. *El problema del horizonte o de isotropía*. Asumiendo que en etapas muy tempranas (antes de la inflación) el Universo estaba dominado por radiación, de acuerdo con (2.13) y la definición de  $H$ ,

$$H^2 \approx \frac{1}{2} t^{-2},$$

y usando la ecuación de F-L, la inflación comienza en un tiempo crítico

$$t_c \approx \alpha(1) \left( \frac{M_p}{T_c} \right) \approx 10^{-35} \text{ s} \approx 10^8 t_p \quad (5.5)$$

donde  $t_p$  es el tiempo de Planck

$$t_p = \left( \frac{\hbar}{2\pi M_p^2 c^5} \right) = 5.3904 \times 10^{-49} \text{ s}.$$

Entonces, el tamaño físico del horizonte en este tiempo es

$$d_H(t_c) \approx \alpha t_c = 10^{-40} (\text{GeV})^{-1} \approx 10^{-25} \text{ cm}$$

Pero, si el Universo sufre una expansión exponencial, con la condición impuesta por el problema de entropía (ec. 5.3), después de la inflación la distancia a un punto que se encontraba en el borde del universo causalmente conectado será

$$d_H(t_c + \Delta t) = Z d_H(t_c) \approx 10^4 \text{ cm} \quad (5.6).$$

Luego, mientras el radio del horizonte observable después de la inflación es  $c(t_c + \Delta t) \approx 10^{-22} \text{ cm}$ , las regiones que en algún momento estuvieron causalmente conectadas son muchísimo más grandes (ec. 5.6). Dicho de otra manera, lo que hace la inflación es sacar del horizonte puntos que causalmente estuvieron conectados, de tal modo que cuando entran nuevamente a éste ya han sido termalizados gracias a que han estado en contacto térmico antes de que el Universo se infle (Fig. 4).

c. *El problema de monopolos magnéticos*. Dado que el cociente de la densidad de monopolos magnéticos a la densidad

<sup>5</sup> La escogencia de esta temperatura crítica responde a los requisitos exigidos por el grupo de renormalización de la Teoría de Gran Unificación. De acuerdo con las estimaciones realizadas la escala de energía donde se restablece la simetría de Gran Unificación,  $T_c$ , debe ser del orden de  $(10^{14} - 10^{15}) \text{ GeV}$ .

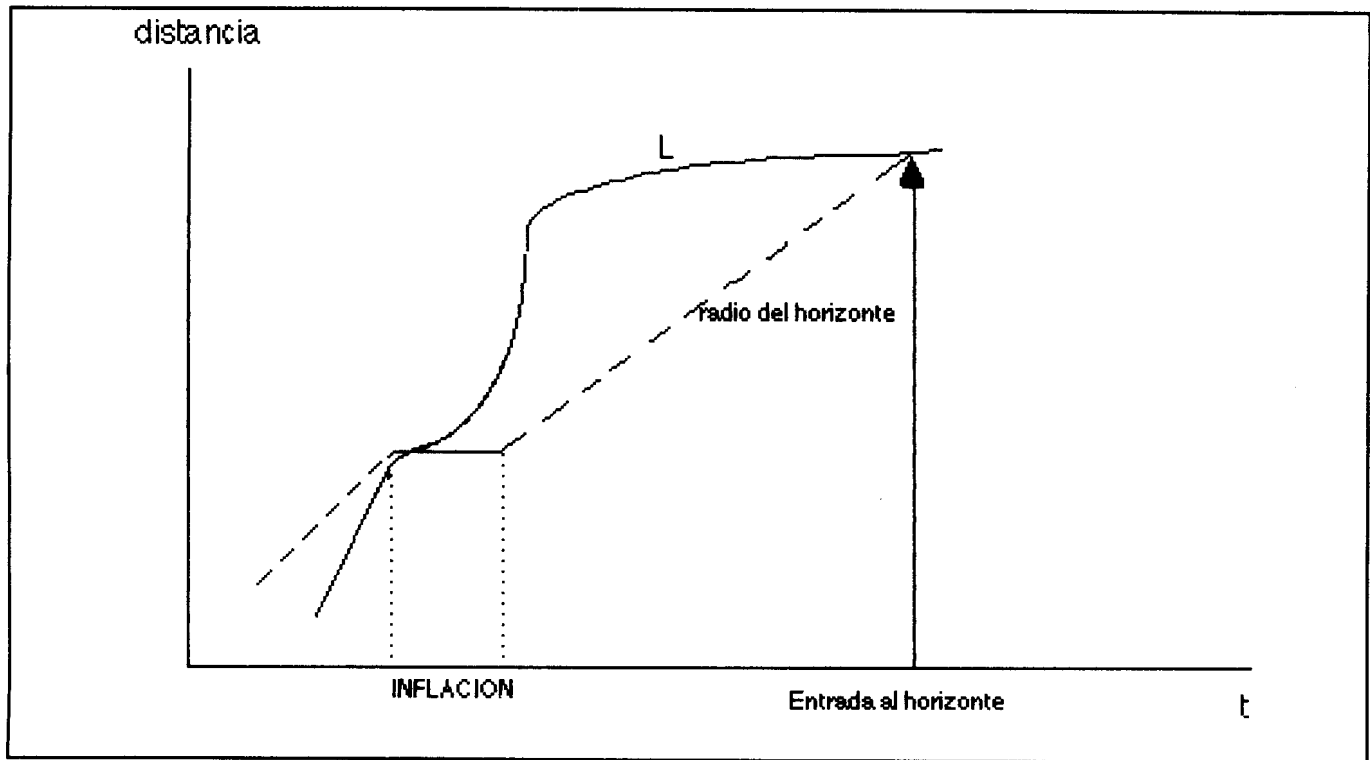


Figura 4. Regiones que antes de inflación se encuentran causalmente conectadas, salen del radio del horizonte durante la expansión exponencial. Después de algún tiempo, estos puntos vuelven a entrar al horizonte y, ya que han estado en contacto causal han quedado termalizados.

de fotones se puede escribir en términos de la densidad de entropía ( $n_\gamma \propto s$ ), i.e.  $n_m/s$ , entonces tenemos que (con  $n_m \propto a_H^{-3}$ ) después de la inflación

$$\left(\frac{n_m}{s}\right)_f = Z^{-3} \left(\frac{n_m}{s}\right)_i$$

donde los subíndices  $i$  y  $f$  denotan los estados antes y después de la inflación respectivamente; con la condición (5.3), todos los monopolos producidos antes de inflación se diluyen quedando un promedio de 1 por radio de horizonte observable. Vale decir que este efecto sobre la abundancia de monopolos es válido para todas las demás partículas producidas antes de la inflación, de modo que, cualquier abundancia actual, e.g. bariones/antibariones, debió generarse después de la inflación (!).

*d. El Problema de Unicidad del Universo.* Este problema definitivamente no se soluciona con la simple introducción de una etapa durante la cual el factor de escala crezca de manera exponencial. Se sabe, en cambio, que es necesario introducir hipótesis aun más fuertes, tales como la existencia de una ecuación de onda del Universo como la postulada por Wheeler-De Witt (ver, por ejemplo, Misner *et al.*, 1973).

No nos extenderemos más en este problema, por cuanto hasta donde son admisibles los modelos teóricos, parece que este problema aun no tiene solución plausible. No obstante, debemos mencionar una nueva alternativa que ha sido sugerida por una nueva versión del modelo inflacionario. Se trata de la Inflación Caótica (Linde, 1990) y de los modelos de "Universos Bebés" introducidos por Hawking. Su relación con el Modelo del Estado Fijo (o Estacionario), desarrollado desde hace más de cuarenta años por Hoyle, Gold y Bondi entre otros (Bondi, 1951), es francamente desafiante para los seguidores del paradigma del Big Bang (todos!) (Linde, 1990; 1994).

## 6. La propuesta original y pre-paradigmática: "vieja inflación"

En la literatura de la cosmología moderna (e.g. Börner, 1988; Turner & Kolb, 1990), se le atribuye la postulación del modelo inflacionario original a Alan Guth (1981). No obstante, el primer modelo inflacionario data de mediados de la década del sesenta y se debe al físico soviético, del Instituto Tecnológico de Moscú, Erast Gliner (1965).

Para esquematizar este modelo, es posible enunciar las hipótesis en que se basa (Linde, 1994):

- H-1. El Universo es muy caliente en sus etapas tempranas.  
 H-2. Existe un campo tal que a altas temperaturas su valor promedio ( $\langle \phi \rangle$ ) es cero y para temperaturas menores a cierto valor crítico, distinto de cero.  
 H-3. La transición de  $\langle \phi \rangle = 0$  a  $\langle \phi \rangle = \sigma \neq 0$  es instantánea.  
 H-4. Antes de que se produzca la transición de fase, el Universo se expande exponencialmente (inflación) y se superenfía.  
 H-5. El recalentamiento del Universo se produce por colisión de burbujas donde se ha roto la simetría.

De estas cinco hipótesis, las dos primeras se mantienen en el "nuevo" modelo inflacionario. En cuanto a las tres últimas, las consecuencias de ellas derivadas obligan a desecharlas.

En el modelo de Guth, el PE es de la forma esquematizada en la figura 3, luego, el crecimiento exponencial se da justamente mientras  $\phi = 0$ . ¿Cómo pasa el campo de este valor nulo a  $\sigma \neq 0$ ? En principio, son posibles dos medios: efecto túnel cuántico y fluctuaciones térmicas (o una combinación de ambas). La segunda alternativa es definitivamente ineficiente (Witten, 1981). Entonces, el mecanismo que queda es el efecto túnel (H-3); así pues, el panorama que ofrece este modelo es el siguiente: mientras el campo está atrapado en el falso vacío, en algunas regiones ("nucleos", para utilizar el lenguaje termodinámico), i.e. burbujas, el campo pasa del falso al verdadero vacío, i.e. de la fase de alta temperatura a la de baja temperatura. En asocio con la transición de fase de primer

orden, a este proceso se le llama "nucleación" refiriéndose a la formación de nucleos donde  $\langle \phi \rangle = \sigma$  (RES).

El primer problema que plantea este modelo es que la "rata de nucleación" (la velocidad con las que se forman burbujas en la nueva fase) es demasiado lenta, de modo que no alcanza el valor crítico necesario para terminar la inflación (Börner, 1988). En segundo lugar, este modelo no permite termalizar el Universo. La razón es la siguiente: en una transición de fase de primer orden, como se supone ésta, la energía de las regiones con nueva simetría se concentra muy rápidamente en las paredes, de modo que estas adquieren una velocidad cercana a la de luz, mientras que al interior la entropía es muy baja. La alternativa para recalentar al Universo es entonces a través de la colisión de burbujas, transformando su energía cinética en energía térmica. No obstante, la "rata de percolación" es sumamente baja (Hawking, 1982).

Entonces, si la versión inflacionaria original fuese correcta tendríamos el siguiente panorama: dado que la nucleación producida a  $T \rightarrow 0$  es muy baja y que no hay un mecanismo efectivo de colisión, el Universo debería presentarse como grandes burbujas con muy baja entropía en su interior (regiones en la nueva fase) rodeadas por una región en la vieja fase (Fig.5), i.e. H-5 falla.

En consecuencia se perfilan las siguientes alternativas:

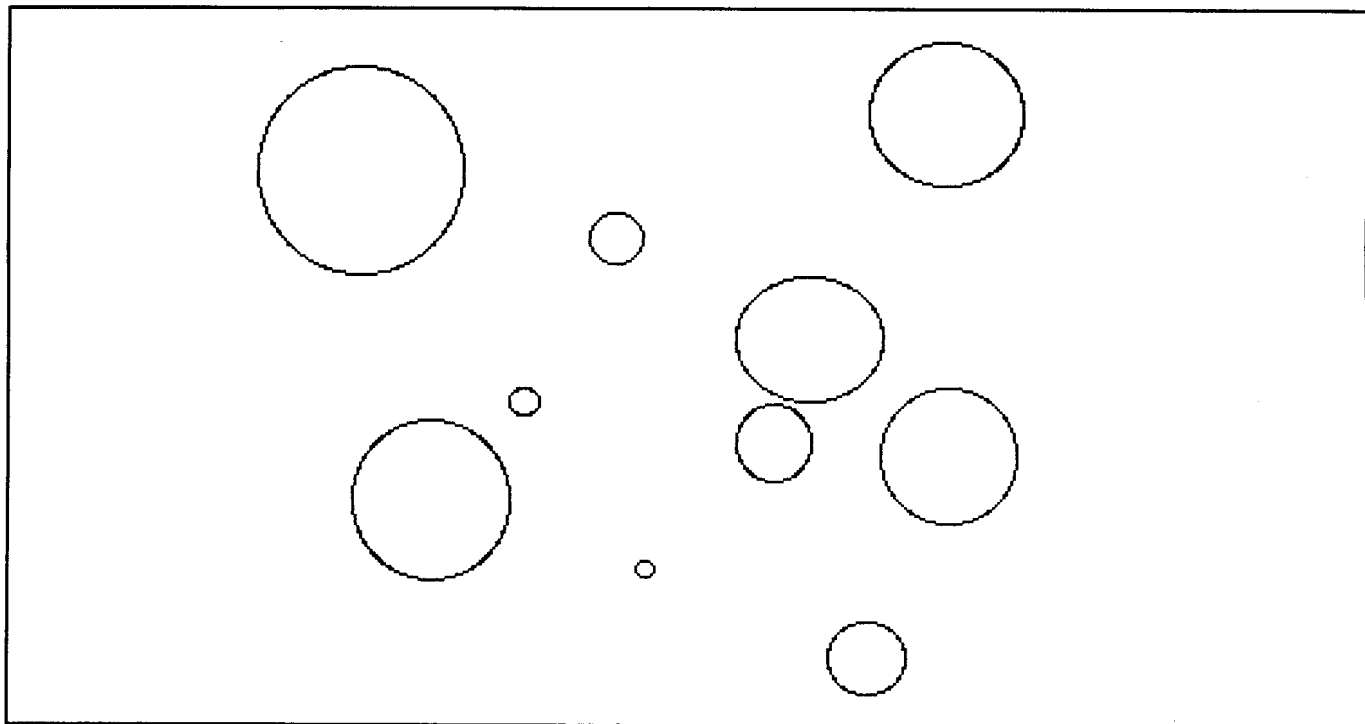


Figura 5. En la "vieja inflación" el Universo presentaría burbujas con enormes vacíos interiores y materia concentrada en las paredes. El espacio inter-burbujas estaría en la antigua fase. Luego, el panorama de este Universo se asemeja al de un queso Emmental y no al Universo con distribución homogénea que observamos al menos a grandes escalas.

1. Abandonar la aproximación hecha para calcular la rata de nucleación, i.e. el método de Callan y Coleman (1977)
2. Introducir efectos gravitacionales (Abbott, 1981)
3. Trabajar con los parámetros de SU(5) escogiendo las condiciones de Coleman-Weinberg (C-W)<sup>6</sup>.

**7. "Nueva Inflación" y Potencial Efectivo de Coleman-Weinberg**

A raíz de los problemas señalados, incluso por el mismo Guth (1981) en el artículo en que se expone este modelo, Linde (1982), Albrecht & Steinhardt (1982) propusieron, de manera separada, una nueva versión de la inflación.

Dado que el principal problema se debe a que el RES se realiza a través de una transición de fase de primer orden, con un salto discontinuo del parámetro de orden (H-3) —el valor esperado del campo en este caso—, la "nueva inflación" propone una evolución continua, y lenta del campo, desde el falso hasta el verdadero vacío. A través de una aproximación semiclásica, en la que se admiten fluctuaciones cuánticas pero mucho más pequeñas que el valor medio del campo, se obliga al potencial a ser lo más plano posible cerca al valor inicial del campo.

La condición de aproximación semiclásica implica que el comportamiento del campo está regido por la ecuación de Klein-Gordon,

$$\square \phi = - \frac{\partial V}{\partial \phi}$$

La expresión correspondiente al dalambertiano, para una métrica de R-W, viene dada por la siguiente ecuación de movimiento del campo:

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} - \frac{1}{R^2} \nabla^2 \phi = - \frac{\partial V}{\partial \phi} \tag{7.1}$$

donde el punto establece derivada temporal. El término espacial disminuye como R<sup>-2</sup>, lo que en el caso de un espacio de de Sitter implica que decrece de manera exponencial (e<sup>-2Ht</sup>), luego el campo escalar Higgs es homogéneo al menos en regiones causalmente conectadas; el término 3Hφ actúa efectivamente como un término de rozamiento. La forma

de la ecuación (7.1) es idéntica a la de una partícula puntual rodando por una colina con un factor de rozamiento dado por el segundo término; de aquí que a esta fase se le llame de rozamiento suave o lento (*slow rollover*).

Pero, si se espera que el campo ruede lentamente, el término de aceleración en la ecuación (7.1) debe ser despreciable comparado con el término de fricción; en tal caso la ecuación de movimiento se reduce a

$$\dot{\phi} = - \frac{V'(\phi)}{3H} \tag{7.2}$$

Esta expresión, para ser aplicada a un modelo particular, exige conocer el PE. La exigencia de un potencial muy plano en el origen y compatible con un término de autointeracción en el lagrangiano de la forma λφ<sup>4</sup> sugiere incorporar el mismo tipo de potencial que produce RES en el modelo estándar de partículas (Coleman, 1973, Coleman & Weinberg, 1973).

Si se considera el lagrangiano

$$L(\phi) = \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} \mu^2 \phi^2 - \frac{1}{4!} \lambda \phi^4 + \frac{1}{2} A \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{2} B \phi^2 - \frac{1}{4!} C \phi^4 \tag{7.3}$$

donde A, B y C son los contratérminos necesarios para que la teoría sea renormalizable. Dado que A no está relacionado con el PE, tenemos que

$$V_{\text{eff}}^{(1)}(\phi_c) = \frac{\lambda}{4!} \phi_c^4 + \frac{1}{2} B^{(1)} \phi_c^2 + \frac{1}{4!} C^{(1)} \phi_c^4 + \text{diagramas} \tag{7.4}$$

Aquí B<sup>(1)</sup> y C<sup>(1)</sup> son los contratérminos a orden (ħ/2π). Los diagramas que aparecen son las contribuciones radiativas. En este punto se debe recordar que los momenta externas son cero (las piernas externas están cortadas para la Acción Efectiva y el PE). En consecuencia, podemos escribir explícitamente la suma de estos gráficos en (7.4), recordando que por cada línea externa hay un factor de φ<sub>c</sub> y por la indistinguibilidad de líneas otro 1/2n (n es el número de vértices) (Branderberger, 1985). Entonces la suma de gráficos es

$$i \sum_{n=1}^{\infty} \int \frac{dk^4}{(2\pi)^4} \frac{1}{2n} \left[ \frac{\frac{1}{2} \lambda \phi_c^2}{k^2 + i\epsilon} \right]^n = \frac{1}{2} \int \frac{dk_E^4}{(2\pi)^4} \ln \left( 1 - \frac{\frac{1}{2} \lambda \phi_c^2}{k_E^2 + i\epsilon} \right),$$

de modo que en la última igualdad se hizo una rotación de Wick al espacio euclidiano. De otro lado, note que cada uno de los

<sup>6</sup>En el artículo original de Guth (1981), se hace referencia a esta posibilidad; los cálculos allí aludidos son los realizados por Witten a quien lamentablemente no se le reconoce esta propuesta que más tarde sería la base de la "nueva inflación".

gráficos individuales presenta singularidad infrarroja, pero la suma sólo posee divergencia logarítmica, lo que mejora substancialmente la situación.

Así, para el caso de un campo escalar único, se tiene que el PE a temperatura cero es

$$V_{\text{eff}}^{(1)}(\phi_c) = \frac{\lambda}{4!} \phi_c^4 + \frac{\lambda^2}{256\pi^2} \phi_c^4 \left[ \ln\left(\frac{\phi_c}{M}\right)^2 - \frac{25}{16} \right].$$

Teniendo en cuenta que, para los modelos que no incluyen efectos gravitacionales o de estructuras topológicas "exóticas" (e.g. supercuerdas), de las tres componentes que contribuyen en el lagrangiano (bosones de Higgs, fermiones y bosones gauge) sólo son significativos los efectos de los bosones gauge, el PE de tipo C-W para un campo Higgs escalar general, con un lagrangiano de la forma de la ec. 7.3, viene dado por

$$V_{\text{eff}}^I(\phi_c, T) = B\phi_c^4 \left[ \ln\left(\frac{\phi_c}{\sigma}\right)^2 - \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{2} B\sigma^4 + CT^2\phi_c^2 \quad (7.5);$$

$$B = \frac{3}{64\pi^2} \left[ \sum_B g_B \left(\frac{m_B}{\sigma}\right)^4 - \sum_F g_F \left(\frac{m_F}{\sigma}\right)^4 \right] \quad (7.6);$$

$$M_X^2 = M_Y^2 = m_B^2 = \frac{1}{12} \text{Tr}\{M^2\} = \frac{5}{12} g^2 \text{Tr}\{\phi_c^2\} \quad (7.7).$$

De modo que se está trabajando en la base diagonalizada de masas;  $g_B$  y  $g_F$  se refieren al número de grados de libertad bosónicos y fermiónicos.

## 8. Potencial Efectivo de C-W para SU(5)

Para el caso de grupo de Gran Unificación SU(5), es posible calcular explícitamente algunos de los parámetros del PE.

$$\text{SU}(5) \xrightarrow{\mathbf{24}} \text{SU}(3)_C \otimes \text{SU}(2)_L \otimes \text{U}(1)_Y \xrightarrow{\mathbf{5}} \text{SU}(3)_C \otimes \text{U}(1)_{E.M.} \quad (8.1);$$

Para el primer rompimiento, debemos escoger la siguiente configuración para el valor esperado del 24-plete Higgs (ver Martínez, 1986):

$$\phi_c = \sigma \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{3}{2} \end{pmatrix} \quad (8.2).$$

Para este modelo, las contribuciones provienen de los bosones intermedarios X e Y. En consecuencia, con (7.7) y (8.2) aplicadas a (6.6), se tiene que

$$B = \frac{3}{64\pi^2} 12 \left[ \left(\frac{25}{8}\right)^2 g^4 \right] = \frac{5625}{1024\pi^2} g^4 = \alpha(10^{-2}) \quad (8.3)$$

con  $g^2=1/3$  —la constante de acople de Gran Unificación— y  $\sigma=10^{14}\text{GeV}$ . De modo que para SU(5) se tiene que

$$\lambda = 80B.$$

## 9. Cotas a parámetros del PE por mediciones de $\delta T/T$ en la RCF

Si la densidad de energía en las primeras etapas hubiera sido completamente homogénea, nuestro Universo sería un plasma isótropo sin estructura alguna, lo que obviamente presentaría un panorama bastante poco interesante. Es claro que la evidencia muestra una situación muy distinta: si bien a escalas muy grandes el Universo es prácticamente homogéneo e isótropo<sup>7</sup>, a partir de escalas menores a  $50h^{-1}\text{Mpc}$  ( $h$  es el parámetro de Hubble normalizada,  $H/100$ ; dada la incertidumbre en su valor,  $0.4 < h < 1$ ) es posible identificar estructuras bien determinadas.

Al formalismo que permite generar estructuras a gran escala a partir de inhomogeneidades en la densidad de energía se le llama de "invariancia gauge de la relatividad general" (Bardeen, 1980; Bardeen *et al.*, 1983).

El resultado más importante del análisis de Bardeen *et al.* es que si bien  $\delta\rho/\rho$  no es invariante, sí lo es la siguiente cantidad

<sup>7</sup> Es interesante notar que la suposición de Einstein de un Universo homogéneo e isótropo no se basó en evidencias observacionales, sino en requisitos matemáticos, i.e. la simplicidad que implica tal supuesto para solucionar las ecuaciones de campo dado que toda la dinámica queda descrita en términos de un sólo parámetro (el factor de escala).



$$\varepsilon = \frac{\delta\rho}{\rho + p} \quad (9.1).$$

La constancia de la cantidad  $\varepsilon$ , permite calcular las amplitudes de las densidades cuando re-cruzan el horizonte,  $\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{HOR}}$ , a partir del valor de  $\varepsilon$  cuando la perturbación sale del horizonte durante la inflación.

Además, por la identificación hecha en la ec. (4.3), y la ley de Stephan-Boltzmann, podemos encontrar la relación entre las fluctuaciones de la densidad de energía y el PE:

$$\delta\rho = V'(\phi)\delta\phi \quad (9.2).$$

Si se calculan las componentes del tensor momentum-energía, es posible ver fácilmente que  $\rho_\phi + p_\phi = \dot{\phi}^2$ ; de modo que si usamos (9.1) y (9.2), se obtiene

$$\varepsilon_{N_\lambda} = \left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{HOR}} = \left(\frac{V'(\phi)}{\dot{\phi}^2}\delta\phi\right)_{N_\lambda} \quad (9.3).$$

donde  $N_\lambda$  denota el número de veces que crece una fluctuación de longitud  $\lambda$ ; no confundir con la constante de autoacople del potencial!

Si se acepta que las fluctuaciones cuánticas del campo,  $\delta\phi$ , en la fase de generación vienen dadas por la temperatura de Hawking, i.e.  $H/2\pi$ , podemos usar la ecuación de movimiento durante el rodamiento suave (ec. 7.2), resulta que

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{HOR}} = \left(\frac{H^2}{\dot{\phi}}\right)_{N_\lambda} \quad (9.4a);$$

Para efectos de relacionar los parámetros del PE con las fluctuaciones, es conveniente mantener la dependencia de  $V'$ . Luego, a través de (7.2), la ecuación (9.4a) queda

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{HOR}} = \left(\frac{2H^3}{V'}\right)_{N_\lambda} \quad (9.4b).$$

De otro lado, podemos calcular la dependencia del número de veces que crece el Universo durante la inflación con el valor del campo:

$$N = \int_{\phi_1}^{\phi_2} H dt = -\int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{3H^2}{V'(\phi)} d\phi \quad (9.5);$$

para un potencial de la forma (7.5) la siguiente aproximación es válida

$$V'(\phi) \approx -\lambda\phi^3 \quad (9.6)$$

y por consiguiente, reemplazando en (9.5),

$$N = \frac{3H^2}{2\lambda} \left(\frac{1}{\phi_1^2} - \frac{1}{\phi_2^2}\right) \approx \frac{3H^2}{2\lambda\phi_1^2} \quad (9.7)$$

donde en la segunda expresión hemos utilizado el hecho de que  $\phi_2 \gg \phi_1$ , i.e. el intervalo  $[\phi_1, \phi_2]$  es "grande".

En consecuencia, retomando la ec. (9.4b) es posible reemplazar  $H^3$  por  $N_\lambda$ , para obtener finalmente

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{HOR}} \approx \left(\frac{8\lambda}{3}\right)^{1/2} (N_\lambda)^{3/2} \quad (9.8).$$

Ahora bien, para una estructura típica  $N_\lambda \approx 50$ . Si tomamos el caso de SU(5), entonces  $\lambda \approx 10^{-1}$  ( $B \approx 10^{-2}$ ). Reemplazando estos valores en la ecuación (9.8),

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{HOR}} \approx 10^2 \quad (9.9).$$

Sin embargo, las fluctuaciones de la densidad de energía están relacionadas con las anisotropías de la RCF. Es claro que el límite observacional impuesto por COBE, y posteriormente confirmado por las mediciones de MIT y Tenerife

$$\frac{\delta T}{T} < 10^{-4}$$

es incompatible con lo encontrado en (9.9).

De hecho, si se pretende alcanzar esta cota es necesario modificar el valor de la constante de acople en (9.8). Las cotas son:

$$\lambda < 10^{-15} \quad (9.10)$$

o en términos de B

$$B < 10^{-16} \quad (9.11).$$

Esta restricción es sin duda el mayor rescollo que deben enfrentar las TGU en lo que respecta a los requisitos impuestos por el modelo inflacionario.

## 10. Conclusiones

En el intento por hacer una descripción completa del Universo en que vivimos, los cosmólogos han reducido el número de parámetros fundamentales a tres: la "constante" de Hubble (H), el parámetro de densidad ( $\Omega$ ) y el parámetro de desaceleración (q). El análisis presentado en este trabajo ha mostrado que de estos tres bastan los dos primeros, dado que el último está relacionado con aquellos de la misma manera en que las ecuaciones de F-L lo están con la ecuación conservación de la energía, i. e. identidades de Bianchi.

Del lado de la física de partículas, podemos decir que para la fase inflacionaria el PE dicta la dinámica del sistema. Este potencial está determinado por la constante de acople del campo Higgs consigo mismo ( $\lambda$  o B), y con la escala de energía a la cual se produce la unificación de interacciones ( $T \approx (10^{14} - 10^{15} \text{ GeV})$ ).

En cuanto a la escala de energía, los efectos de su escogencia no afectan de forma significativa las predicciones hechas por la inflación; además, dado que viene determinada por las ecuaciones del grupo renormalización, para todos los modelos de GU es del mismo orden (no estamos considerando aquí modelos supersimétricos, donde las escalas de energía alcanzan la masa de Planck).

No podemos decir lo mismo de la constante de acople, determinada por el espectro de masas generado en el RES (ec.8.3). Para este caso, y como hemos mostrado en el desarrollo de la última sección, las exigencias cosmológicas obligan a hacer dicho parámetro tan pequeño que su ajuste parece poco natural. Debemos llamar la atención sobre el hecho de que esta restricción no se limita al caso de SU(5), ya que en la deducción de las fluctuaciones de la densidad de energía sólo se supuso un modelo del tipo  $\lambda\phi^4$ , sin hacer referencia explícita a grupo de unificación alguno. En consecuencia: las restricciones al valor de  $\lambda$ , para ajustarse a los límites impuestos por las anisotropías de la RCF, son un escollo que deben enfrentar modelos  $\lambda\phi^4$ , incluso más complejos que SU(5). No obstante, respecto a nuestro caso de jago podemos decir:

1. Es solución del modelo minimal del Modelo Estándar de Partículas.
2. Unifica las interacciones.
3. Predice correctamente el ángulo de Weinberg.
4. Explica por qué la masa del neutrino es cero.

Pero al mismo tiempo presenta los siguiente problemas:

1. Predice el decaimiento del protón.
2. Tiene, en total, 21 parámetros arbitrarios.
3. No explica el problema de la Constante Cosmológica

4. La constante de acople predice fluctuaciones en la densidad de energía  $\propto (10^2) \gg 10^{-4}$ . Además, bajo este contexto la aproximación semiclásica deja de ser válida.

No podemos desconocer, para finalizar, los esfuerzos llevados a cabo para superar los problemas mencionados. En particular **Shafi y Vilenkin** (1984), han propuesto una extensión del modelo minimal, introduciendo un campo escalar Higgs (Inflatón) acoplado muy débilmente y encargado solamente de producir inflación. Sin embargo, este modelo es poco natural si se tiene en cuenta que el ajuste de la constante de acople se realiza precisamente para arreglar los problemas mencionados e introduce un nuevo campo *ad hoc*. De otro lado, los trabajos recientes de **Linde** (1990) se encaminan hacia la construcción de un modelo inflacionario que no parte de la condición de equilibrio térmico (la hipótesis H-1, que subsiste en la nueva inflación, desaparece) y que, por consiguiente, no obliga a partir de un Universo simétrico, donde haya unificación de interacciones. Este nuevo escenario, conocido como Inflación Caótica, no sólo pretende salirle al paso a las objeciones puestas sobre las TGU. Sus pretensiones llegan hasta tratar de explicar lo que más arriba hemos llamado el problema de la Unidad del Universo. Dice **Linde** (1990: 160) al respecto: "*Unfortunately (or, may be, fortunately), it may take as much  $10^{5.16}$  years until the significance of the current work on this problem will be fully appreciated*". Si queremos ser honestos con la evidencia, debemos comenzar a hacerle frente a la posibilidad de que la Gran Unificación deberá pasar al rincón de los juguetes viejos: si bien nos enseñó muchas cosas, ya no parece viable. Lo mismo podrá decirse del ampliamente aceptado "Modelo Estándar de la Cosmología".

## Agradecimientos

En primer lugar queremos agradecer a la Fundación Mazda para el Arte y la Ciencia cuya beca a uno de los autores (De Greiff) fue indispensable para realizar este trabajo. Igualmente expresamos nuestros sinceros agradecimientos al Departamento de Física y al Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo.

## Bibliografía

- Abbott, L.F.**. 1981. "Gravitational Effects on the SU(5) Breaking Phase Transition for a Coleman-Weinberg Potential" Nucl. Phys., **B185**: 233.
- Aitchinson, I.J.R.**. 1985. "Nothing's Plenty". CONTEMP Phys., **26**: 333.
- Albrecht, A & P. Steinhardt**. 1982. "Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively-Induced Symmetry Breaking". Phys. Rev. Lett., **48**: 1220.

- Bailin, D. & A. Love.** 1986. "Introduction to Gauge Field Theory". Adam Hilger, Bristol and Boston. London.
- Bardeen, J.M.** 1980. "Gauge-Invariant Cosmological Perturbations". *Phys. Rev.*, **D22**: 1882.
- Bardeen, J.M., Steinhardt, P.J. & M.S Turner.** "Spontaneous Creation of Almost Scale-Free Density Perturbations in an Inflationary Universe". 1983. *Phys. Rev.*, **D28**: 679.
- Bondi, H.** 1951. "Cosmology". Cambridge University Press. Londres.
- Börner, G.** 1988. "The Early Universe-Facts and Fiction". Springer-Verlag. Berlín.
- Branderberger, R.H.** 1985. "Quantum field methods and inflationary universe models". *Rev. Mod. Phys.*, **57**, 1: 1.
- Callan, Jr. & S. Coleman.** "Fate of the False Vacuum. II: First Quantum Corrections". 1977. *Phys. Rev.*, **D16**: 1762.
- Coleman, S.** 1973. "Laws in Hadronic Matter". **Zichichi, A.** (Ed.). [1975] (Erice). Academic Press: New York.
- Coleman, S. & E. Weinberg.** 1973. "Radiative Corrections as the Origin of Spontaneous Symmetry Breaking". *Phys. Rev. D.*, **7**: 1888.
- De Greiff, A.** 1992. "Fenomenología de la anisotropía a gran escala de la radiación cósmica de fondo". Tesis FIS-92-I-02. Universidad de los Andes. Bogotá D.C..
- Ellis, J.** En **Corrigan, R.A. & W.P Trower** (Eds.). 1978. "Magnetic Monopoles", Plenum Publishing Corp.. Citado por **Börner** (1988).
- Glashow, S.L.** 1958. Ph. D. Thesis (Harvard University). Citado por **Börner** (1988).
- Gliner, E.** 1965. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, **49**: 542 [1965. *Sov. Phys. JETP*, **22**: 378]. Citado por **Linde** (1990).
- Guth, A.** 1981. "Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems". *Phys. Rev. D*, **23**: 347.
- Halzen, F., & A. Martin.** 1983. "Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics". John Wiley & Sons. New York.
- Hawking, S.** 1982. "The development of Irregularities in a Single Bubble Inflationary Universe". *Phys. Lett.*, **115B**: 295.
- Landau, L.D. & E.M. Lifshitz.** 1966. "Theorie du Champ". Editions MIR. Moscou.
- Linde, A.** 1982. "A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution to Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy and Primordial Monopoles Problems". *Phys. Lett.*, **108B**: 389.
- Linde, A.** 1990. "Inflation and Quantum Cosmology". Academic Press Inc.. Boston.
- Linde, A.** 1994. "From the Big Bang theory to the theory of a Stationary Universe". **Sánchez, N. & A. Zichichi** (Eds.). *3rd Course "Current Topics in Astrofundamental Physics"*. (Erice). En prensa.
- Martínez, R.** 1986. "El Modelo de Georgi-Glashow", SU(5). Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Medellín. Especialmente las Secciones V y VI.
- Mather, J.C., et al.** "Measurements of the Cosmic Microwave Background Spectrum by the COBE FIRAS Instruments" 1994. *ApJ*, **420**: 439.
- Misner, C.W., Thorne, K.S. & J.A. Wheeler.** 1973. "Gravitation". W.H. Freeman & Co.. San Francisco.
- Nanopoulos, D.V.** 1983. "Unified Field Theories and The Early Universe". Conferencia dictada en el *First-ESO-CERN Symposium "Large Scale Structure of the Universe, Cosmology and Fundamental Physics"*. Geneva. Ref. TH. 3778-CERN.
- Polyakov, A.M.** 1974. *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pisma Red.*, **20**: 194 (*JETP Lett.*, **20**: 194). Citado por **Nanopoulos** (1983).
- Salam, A.** 1968. Proc. 8th Nobel Symp. on El. Theory. Alquist, Stokholm. Citado por **Börner** (1988).
- Shafi, Q. & A. Vilenkin.** 1984. "Inflation with SU(5)". *Phys. Rev. Lett.*, **52**: 691.
- Smoot, G., et al.** 1992. "Structure in the COBE DMR First Year Maps". *APJL*, **396**: L1.
- Tammann, G.A.** 1994. "Recent results on H<sub>0</sub> from Space Telescope and the time scale test". **Sánchez N. & A. Zichichi** (Eds.). (Erice). *3rd Course "Current Topics in Astrofundamental Physics"*. En prensa.
- t'Hooft, G.** 1974. *Nucl. Phys.*, **B79**: 276. Citado por **Nanopoulos** (1983).
- Turner, M.S. & E.W. Kolb.** 1990. "The Early Universe". Addison-Wesley Publishing Company.
- Weinberg, S.** 1967. "A Model of Leptons". *Phys. Rev. Lett.*, **19**: 1264.
- Witten, E.** 1981. *Nucl. Phys.*, **B171**: 477. Citado por **Guth** (1981).

# NOTAS PARA LA BIOGRAFIA DE CUATRO BOTANICOS BOGOTANOS DEL SIGLO XIX

por

Santiago Díaz Piedrahita<sup>1</sup>

## Resumen

**Díaz-Piedrahita, S.:** Notas para la biografía de cuatro botánicos bogotanos del siglo XIX. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 20(76): 111-119, 1996. ISSN 0370-3908.

Se presenta una síntesis biográfica de Francisco Bayón Fernández (1817- 1893), José Jerónimo Triana Silva (1828-1890), Carlos Cuervo Márquez (1857-1930) y Santiago Cortés Sarmiento (1854-1924)

**Palabras claves:** Botánica - historia - Colombia - F. Bayón - J. Triana - C. Cuervo - S. Cortés.

## Abstract

Biographical notes on Francisco Bayón Fernández (1817-1893), José Jerónimo Triana Silva (1828-1890), Carlos Cuervo Márquez (1857-1930) and Santiago Cortés Sarmiento (1854-1924) are presented.

**Key words:** Botany - history - Colombia - F. Bayón - J. Triana - C. Cuervo - S. Cortés.

La Ciencia en Colombia ha tenido un desarrollo relativamente armónico y está fundamentada en una tradición marcada por tres momentos fundamentales y por tres figuras que les dieron vida. El primero de ellos lo constituye la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada, empresa que sirve como punto de partida y que tiene como figura central a **José Celestino Mutis**; el segundo momento corresponde a la realización de la Comisión Corográfica de los Estados Unidos de

Colombia y su figura principal es **Agustín Codazzi**; el tercer momento no está tan bien delimitado como los anteriores, pero corresponde a la institucionalización de la ciencia, y tiene una figura central en lo que a las ciencias naturales se refiere; se trata de **Enrique Pérez Arbeláez**. En estos tres momentos fundamentales y durante los interregnos participaron varios naturalistas bogotanos, quienes contribuyeron en diferente medida a ese desarrollo. En esta oportunidad nos referiremos a cuatro de ellos, aunados por varios factores, entre ellos el de haber publicado al menos un libro relativo a la botánica.

<sup>1</sup> Miembro de número de las Academias Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales y Colombiana de Historia.

De los cuatro personajes que hoy nos ocupan, dos nacieron en la primera mitad del siglo XIX y se formaron como médicos y botánicos, destacándose el primero como catedrático y el segundo como gran cultor de la que **Linneo** llamara la "ciencia amable"; los dos últimos nacieron en la segunda mitad del siglo y tienen en común haber sido miembros fundadores de la Academia Colombiana de Historia. Son nuestros protagonistas **Francisco Bayón Fernández**, **José Jerónimo Triana Silva**, **Carlos Cuervo Márquez** y **Santiago Cortés Sarmiento**.

### Dos médicos naturalistas. Bayón y Triana

El doctor **Francisco Bayón Fernández** nació en Bogotá en enero de 1817. Pocas luces tenemos en relación con su infancia y juventud. Por **Florentino Vezga**, quien fuese su discípulo, sabemos que su padre era un inteligente abogado que falleció cuando el futuro médico y naturalista contaba apenas con tres años de edad, circunstancia que le dejó pobre, sin hermanos y sin protectores. No obstante, por su inclinación al estudio y sobre todo por su dedicación y constancia, logró sobreponerse a estas adversidades obteniendo una beca en el Colegio Mayor de San Bartolomé. **Vezga** lo señala como un ejemplo *"de lo que pueden la inclinación al saber y la perseverancia en buscar los medios de alcanzarlo, en lucha con los obstáculos que opone la adversidad y que multiplica con frecuencia la mala organización de la enseñanza"*. **Bayón** descubrió su inclinación a la botánica, asistiendo quizás por curiosidad a la cátedra que dictaba **Francisco Javier Matís**, comisionado para tal efecto por el gobierno en el Colegio de San Bartolomé de Bogotá. Retirado **Matís** le reemplazó en las lecciones de botánica el sacerdote tulueño **Juán María Céspedes**. Sabemos que estas cátedras duraron poco tiempo; sin embargo, nuestro personaje ya estaba picado por el virus de la botánica y *"a fuerza de constancia y de paciencia"* aprovechó las enseñanzas impartidas tanto por el ya anciano pintor como por el clérigo vallecaucano. Vale la pena recordar como **Matís**, debido a su formación empírica y eminentemente práctica, se había refugiado en el sistema sexual de clasificación de **Linneo**, único método que había conocido a fuerza de hacer disecciones de flores y de dibujarlas. Este sistema había dado paso a los de tipo natural como los de **De Candolle** y **Jussieu**. **Céspedes** también se había formado como autodidacta de la botánica en el sistema linneano, pero había tenido que modernizar sus conceptos por exigencia de los estudiantes bogotanos, circunstancia que no logró superar el pintor de Guaduas y que ocasionó en 1830 su retiro de la cátedra, cuando reemplazaba al titular.

**Bayón** perseveró en el estudio de las plantas y compartió más de una excursión por los alrededores de la capital con **Matís** y con **Céspedes**. Al morir este último, quedó como único depositario de la botánica tradicional el anciano pintor, quien aunque pobre y agobiado, no se negaba a acompañar al entusiasta joven en sus recorridos botánicos, algunos de ellos compartidos con otro aspirante a médico y también entusiasta botánico, el futuro doctor **Triana**. Célebre es la anécdota relatada tanto por **Vezga** como por **Triana**, de acuerdo con la cual los discípulos en más de una oportunidad debieron cargar en sus espaldas al senecto pintor en los ascensos y en los pasos difíciles, con tal de garantizar sus enseñanzas, debiendo esperar con paciencia a que acudieran a su cansada memoria los nombres de las especies que iban encontrando al paso y que el anciano se esforzaba en recordar.

**Bayón** no se contentó con estas lecciones de tipo práctico, que de hecho ya constituían una buena base, y encargó a Europa varias obras necesarias para complementar su formación y perfeccionar sus conocimientos. Fue en esta forma como **Céspedes** y **Bayón** tomaron conocimiento de nuevas orientaciones y conceptos que introdujeron a través de la cátedra en los colegios de San Bartolomé y del Rosario. Es a partir de ellos que se implantan disciplinas tales como la fisiología y la patología vegetales y se da un nuevo enfoque a la anatomía de las plantas. A **Bayón** se debe también la innovación de introducir el estudio de la Filosofía Botánica, obra que constituye uno de los pilares de la nomenclatura vegetal. Los deberes contraídos como profesor y las exigencias de la juventud sirvieron al catedrático bogotano de poderoso estímulo para avanzar en sus conocimientos y superar con creces a quienes habían sido sus maestros.

Aunque se graduó en 1842 en la Universidad Central, cuando el Congreso de 1841 expidió la ley que reglamentaba el ejercicio de la medicina, **Bayón** aparece en la lista de los facultativos autorizados que podían ejercer dicha profesión por estar incorporados en la Facultad de Medicina; el joven médico se desempeñó con éxito en este campo, no solo como académico, sino como facultativo en el Hospital de Caridad y en el de San Vicente de Paúl; igualmente se desempeñó en cargos públicos como el de vacunador oficial; no obstante, más que como galeno, se le recuerda como catedrático de larga data y profesor de clínica que ganó el respeto y admiración de sus discípulos, tanto de la Universidad Nacional y de los establecimientos oficiales, como de los del Colegio Independencia, institución particular que funcionaba en 1858, y entre quienes debemos destacar a

los integrantes de la Sociedad Caldas, de la que hacían parte, además del profesor de botánica, sus seis discípulos entre los cuales se contaban **Liborio Zerda** y **Florentino Vezga**; esta Sociedad dió paso en 1859 a la célebre Sociedad de Naturalistas Neogranadinos, hecho ocurrido durante un ascenso de sus integrantes al cerro de Monserrate en compañía del profesor de mineralogía y química, don **Ezequiel Uricoechea**. Esta agrupación de personajes interesados en impulsar la ciencia se constituye en la primera sociedad científica funcional existente en nuestro medio, por ser la primera en dejar un testimonio escrito de sus realizaciones, las "Contribuciones de Colombia a las ciencias y a las artes".

Reorganizada en 1867 la Universidad Central bajo el nombre de Universidad Nacional, **Bayón** se vinculó a ella y entre las cátedras que regentó, además de la de botánica, están la de jilolofía y la de farmacognosia. Su labor se encaminó a la organización y dirección de la Escuela de Ciencias Naturales. Además de numerosísimas referencias en los Anales de la Universidad Nacional, como testimonio escrito de su labor pedagógica e investigativa nos quedó el libro titulado: "Ensayo de Jililofía colombiana o clasificación y descripción de las maderas colombianas", obra publicada en 1871 y presentada en la Exposición Nacional organizada para conmemorar el 20 de julio de dicho año; la misma es fruto de la experiencia alcanzada en la cátedra y es a la vez el resultado de un trabajo investigativo ordenado por la Rectoría de la Universidad, en lo que hoy podríamos denominar un proyecto de investigación. En este libro se analizan cuidadosamente algunas maderas recolectadas en buena parte del territorio colombiano. De su labor docente queda como recuerdo un álbum que contiene 47 acuarelas hechas por 29 de los 30 alumnos de la Escuela de Ciencias Naturales entre 1869 y 1870. Quizás su discípulo más aventajado fue **Ceferino Hurtado**, también médico y botánico y quien le colaboró como secretario en la Escuela entre 1870 y 1875; **Hurtado** como testimonio de su labor investigativa y docente nos legó un libro de carácter general titulado "Compendio de Botánica Elemental", obra bastante completa y de índole general publicada en Curaçao por encargo del gobierno holandés; además de la parte descriptiva, no muy original, pero sí muy bien sintetizada, se agrega un capítulo donde se hace énfasis en las plantas de las colonias holandesas del Caribe y de la flora del norte de Suramérica. También discípulo aventajado fue **Pedro María Ibáñez**, quien dedica sus "Memorias para la historia de la medicina en Santafé de Bogotá" a los miembros del jurado examinador de grado profesional, doctores **Jorge Vargas**, **Manuel Plata Azuero**, **Francisco Bayón** y **Proto Gómez**.

Señala **Ibáñez** que **Bayón** pertenecía a la Sociedad Médica y de Ciencias Naturales de Bogotá, en cuyo órgano, así como en otras publicaciones periódicas de la ciudad dio a conocer varios escritos sobre las plantas útiles y medicinales de la flora colombiana, además de varios otros escritos que permanecían inéditos por 1884. Entre los aparecidos cita los titulados: "La esponjilla, *Momordica balsamica*", "Jacaranda *mimosifolia*", "El Manzanillo", "La Familia de las Ericáceas", "La Necha", "El Curare", "*Anacardium rhinocarpus*", El Cedrón", "El Hachón", "El Palo Santo", "*Espigalia hamelloides*" y "Persea *gratissima*".

**Bayón** se desempeñó como Botánico Consultor del Gobierno Nacional en varias oportunidades; como tal le correspondió evaluar la labor adelantada por **Triana** como botánico de la Comisión Corográfica. Su concepto, expresado en 1856, es bastante objetivo y elogia la labor de quien fuera su compañero en algunas de las excursiones realizadas con **Matfs**. Igualmente entre quienes prestaron servicios al Gobierno durante la guerra como cirujanos del Ejército encontramos al Dr. **Bayón**, quien en 1876 hizo parte de la Comisión de médicos enviados por el Gobierno para aliviar los heridos y enfermos del campamento de "Garrapata". Fue Presidente de la Junta General de Beneficencia y tuvo a su cargo el manejo de los fondos destinados al mantenimiento de los asilos de indigentes.

**Ibáñez** describe a su maestro como "hombre de severa virtud y de costumbres austeras. Modesto hasta la exageración, si cabe exageración en la modestia, pasa su vida dedicado al estudio, a la enseñanza y al ejercicio de su profesión. Goza con justicia de la estimación pública y del respeto y aprecio de sus profesores". La muerte sorprendió a **Bayón** en septiembre de 1893.

Al momento de su muerte, **Bayón** era el decano del cuerpo médico bogotano y se le reconocía como un varón justo y cristiano que honraba con sus virtudes a la sociedad capitalina. **Antonio Triana**, el hijo menor del botánico bogotano, vivía por entonces en Bogotá y era alumno del Colegio del Rosario. La Academia de Medicina le solicitó al joven **Triana** decir unas palabras en nombre de su padre durante las exequias realizadas en la Iglesia de San Francisco. **Antonio** dijo: "Señores. Ni mi edad, ni mi carácter de estudiante me autorizan para ocupar esta tribuna. Pero si mi padre el Sr. José Triana viviera y se hallara presente en esta triste ceremonia, estaría despidiendo aquí, públicamente a quien fue su maestro y su cariñoso amigo. Dios dispuso que mi padre partiera antes que su anciano preceptor, murió en tierra que no

me atrevo a llamar extranjera, porque en ella fue estimado y querido y porque en ella me tocó ver la luz primera; pero jamás olvidó mi padre a Colombia y a sus amigos, y enseñó a sus hijos a querer esta patria y estimar a sus ciudadanos distinguidos. El doctor Bayón ya se ha encontrado en la eternidad con su antiguo discípulo y amigo. El hijo de Triana procura pagar en nombre de su padre una deuda de agradecimiento, de estimación y de cariño”.

Sin duda el mayor de los botánicos sistemáticos colombianos ha sido **José Jerónimo Triana Silva**. Este calificativo está fundamentado ampliamente tanto en la calidad como en la magnitud de su obra. Nació **Triana** en Bogotá el 22 de mayo de 1828 en el hogar formado por el notable educador **José María Triana Algarra** y por **Josefa Paula Silva**, siendo el quinto hijo de una numerosa familia que por diversas razones ha ocupado un lugar destacado en muchos aspectos de la vida nacional. De su primera infancia poco se conoce. Sus estudios los realizó en el famoso “Colegio del Espíritu Santo”, plantel fundado y dirigido por quien luego sería su buen amigo y dos veces cuñado, el destacado educador y hombre público **Lorenzo María Lleras**. En este mismo colegio **Triana** fue profesor de varias asignaturas y Director Adjunto.

**Triana** no fue ajeno a la política ni al arte, pero poco a poco se fue alejando de estas actividades para dedicarse en forma casi exclusiva al estudio de la medicina, y como accesorio de esta al profundizamiento de la botánica. Durante su época de estudiante entabló amistad con el ya anciano y casi ciego **Francisco Javier Matís**, último superstite de la Expedición Botánica, a quien visitaba en el Molino del Cubo para recibir orientaciones y conocimientos, que como más tarde diría, “*eran los últimos fulgores de una lámpara que se apaga*”. Como ya se indicó, muchas de estas visitas y algunas de las pequeñas excursiones fueron compartidas con **Francisco Bayón**. Cuando contaba 24 años de edad, y luego de cumplir con las normas exigidas por el Colegio Médico de Bogotá, **Triana** obtuvo en diciembre de 1852 el título respectivo. Años más tarde obtendría en París la licencia para ejercer la medicina en Francia. Sin embargo sólo en forma ocasional desempeñó esta actividad tanto en Colombia como durante su larga residencia en París. A pesar de ello, nunca abandonó del todo su profesión inicial y siempre mostró interés por las ciencias de la salud, por su innovación y por la introducción de nuevas sustancias y drogas de origen vegetal que pudieran contribuir al alivio del dolor y al combate de las enfermedades.

La botánica le absorbió, razón por la cual dedicó la mayor parte de su existencia a esta ciencia. Sus primeros

escritos corresponden a artículos divulgativos sobre la utilidad de algunas plantas los cuales aparecen a partir de 1850 en “El Día” y desde 1852 en “El Neogranadino”. Al ser organizada la Comisión Corográfica, **Agustín Codazzi**, por insinuación del pintor **Carmelo Fernández**, sobrino del General **Páez** y quien había trabajado con el geógrafo en los levantamientos cartográficos de Venezuela, le invitó a participar en la misma como responsable de la parte botánica. Su incorporación a esta importante empresa ocurrió el 10 de diciembre de 1850. La misión a él asignada era la de coleccionar, examinar, clasificar y dar nombre a las plantas encontradas en las distintas regiones. Los recorridos realizados por **Triana** como botánico de la Comisión pueden ser resumidos así:

Durante 1851 cubrió las llamadas provincias del norte (norte de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Norte de Santander y sur del Cesar). En desarrollo de este viaje se encontró en Ocaña con **Louis Joseph Schlim**; allí este último recolectaba plantas por encargo de **Jean Jules Linden**, botánico que había visitado el país hacía algunos años. Trabaron amistad y trabajaron juntos en los alrededores de esta población; por insinuación de **Schlim**, **Triana** inició con el botánico luxemburgués y director del Jardín Zoológico de Bruselas el intercambio de duplicados de plantas por libros, obras que serían fundamentales para complementar su formación científica. En compañía de **Julius von Warscewicz** y durante la segunda mitad del año, recorrió los alrededores de Bogotá, el suroeste de Cundinamarca, parte del Tolima, el Quindío y el Valle, llegando hasta Buenaventura. **Warscewicz** prosiguió por vía marítima hacia Guayaquil en tanto que **Triana** regresó a la capital.

Durante 1852 y junto con el equipo de la Comisión recorrió el suroeste de Cundinamarca, las llanuras del Tolima, las montañas del Quindío, Risaralda y Caldas y el sur de Antioquia; el regreso a Bogotá se hizo por la vía de Guaduas. La parte final de este año fue destinada a la organización de las colecciones; no obstante, hizo algunas salidas a los alrededores de la Capital en compañía de **Isaac Farwell Holton**, quien por la época realizaba un recorrido por el país tanto en plan de observación como a la búsqueda de plantas.

En el curso de 1853 la Comisión llevó a cabo el viaje más interesante desde el punto de vista botánico. El mismo abarcó el suroeste de Cundinamarca, los llanos del Tolima, los Andes del Quindío, el noroeste del Valle, la mitad sur del Chocó, incluida la travesía de la Cordillera Occidental, la Costa del Pacífico desde la desembocadura del río San Juan hasta Tumaco, los Andes de Nariño incluyendo las

altiplanicies de Túquerres y Pasto y el ascenso a los volcanes de Cumbal y Azufral. El regreso a Bogotá se hizo por Popayán y Cali atravesando nuevamente el Paso del Quindío y los llanos del Tolima.

En 1854 recorrió los alrededores de Bogotá en compañía de **Hermann Karsten**, luego de lo cual se dirigieron por Ibagué al Paso del Quindío para posteriormente bajar hasta Cartago. **Karsten** prosiguió su viaje hacia Ecuador en tanto que **Triana** regresó a Bogotá. Hacia la mitad del año **Triana** debió incorporarse al Ejército del Sur bajo el comando del General **José Hilario López**, participando así en la contienda civil ocasionada por el golpe de cuartel dado por el General **José María Melo**. Destinado al Alto Valle del río Magdalena, aprovechó oportunamente los altos de la tropa para herborizar las vertientes del suroccidente de Cundinamarca.

Durante 1855 y ya retornada la normalidad se dedicó con intensidad a herborizar en los alrededores de Bogotá y en las dos vertientes de la Cordillera Oriental en territorio de Cundinamarca y Meta, incluidos el curso del río Sumapaz hasta casi sus fuentes, la provincia del Guavio hasta los Farallones de Medina y los llanos de San Martín. La excursión al Meta y zonas aledañas de Cundinamarca fue compartida con **Karsten** quien ya había regresado del Ecuador. Durante su recorrido por Colombia el naturalista alemán entabló buenos nexos de amistad con **Triana**. Fruto de esta relación es la publicación conjunta de varios géneros y especies aparecidos inicialmente en un folleto publicado por **Triana** en Bogotá y luego redescritos por **Karsten** en la revista *Linnaea*.

El año de 1856 fue destinado por **Triana** al ordenamiento, clasificación y determinación de las numerosas plantas que constituían su herbario, así como a la preparación de las series de duplicados (algo más de 35.000 exsiccados) que serían llevados a Europa y a la elaboración de las etiquetas y de los respectivos catálogos. Su viaje al Viejo Continente se produjo a comienzos de 1857, habiendo sido aprovechadas las primeras etapas del mismo para recoger plantas en las riberas del río Magdalena a partir de Ambalema. En Cartagena embarcó con destino a Inglaterra y de allí pasó a Francia.

Como consecuencia del trabajo adelantado durante los viajes atrás reseñados, el botánico bogotano conformó un riquísimo herbario de cerca de 60.000 exsiccados correspondientes a casi 8.000 números de colección. El 1º de septiembre de 1856 y en cumplimiento de los contratos suscritos hasta la fecha como integrante de la Comisión Corográfica, hizo entrega formal al Gobierno de la primera serie del herbario con su respectivo catálogo, el cual fue

datado simbólicamente el 20 de julio del mismo año. El herbario estaba ordenado en 38 volúmenes debidamente clasificados de acuerdo con el sistema de **Endlicher**. En las 196 páginas del catálogo se proporciona información relativa a la familia, el género y en muchos casos la especie de cada planta, así como a los nombres vulgares, usos y aplicaciones de muchas de las especies.

Cumplidos cabalmente sus compromisos y culminados sus estudios y trabajos, **Triana** optó por dirigirse a Europa con el fin de perfeccionar sus conocimientos botánicos. Para lograr este fin suscribió un nuevo contrato con el gobierno granadino, esta vez para realizar en el término de dos años, con base en sus datos de campo y en sus colecciones y con la ayuda de los herbarios europeos, un libro sobre las plantas útiles del territorio colombiano. El contrato suscrito en julio de 1855 fue firmado con el convencimiento de que la flora colombiana era ampliamente conocida y que en Europa se disponía de publicaciones recientes sobre la misma. El viaje se realizó con una demora de casi dos años. Una vez instalado en París entró en contacto con destacados naturalistas del Museo de Historia Natural entre quienes ganó merecida fama como experto en la flora tropical de Suramérica; con varios de ellos entabló nexos de amistad. La más importante de estas relaciones fue la entablada con **Joseph Decaisne**, quien además de colaborar ampliamente, influyó en muchas de sus decisiones, entre ellas la de enfrentarse al reto de elaborar una flora de Colombia, requisito previo para poder redactar cualquier libro sobre las plantas útiles. Además su herbario estaba lleno de novedades taxonómicas que era necesario dar a conocer a la comunidad científica internacional.

Superados muchos obstáculos debidos a la distancia, la dificultad y demora en las comunicaciones, los cambios de gobierno y las contiendas civiles, consiguió las necesarias prórrogas y modificaciones del contrato inicial y abocó en asocio con **Jules Emile Planchon** la elaboración de la flora. Mientras se resolvían los problemas pertinentes a su contrato con el gobierno colombiano y a la publicación de la obra que luego aparecería con el título de "Prodromus florae Novo Granatensis", preparó, también en colaboración con el botánico de Montpellier, una completa Memoria sobre las Gutíferas, obra aparecida en 1861 y un trabajo sobre las brácteas de las Marcgraviáceas publicado en 1862. El Prodromus concluyó de editarse entre 1863 y 1867, cuando se terminó de publicar la parte relativa a la criptogamia, la cual había sido encargada a destacados especialistas.

En lo que respecta a las plantas útiles, **Triana** publicó varios artículos sobre el tema, siendo el más completo e



interesante el aparecido en 1859 bajo el título de "Plantes usuelles de la Nouvelle Grenade". Aparte de las obras señaladas y de numerosos artículos publicados individualmente o en asocio con **Planchon**, elaboró dos trabajos básicos sobre la familia de las melastomatáceas, uno relativo a su clasificación (*Dispositio Melastomatacearum*, 1865) y el otro, una excelente monografía (*Les Melastomacées*, 1871), quizás su mayor obra botánica. Además y mediante el sistema de suscripción logró publicar en lujosa edición un estudio sobre la quinina (*Nouvelles études sur les quinquinas*, 1872).

En 1882 y luego de múltiples e insistentes gestiones, tuvo por fin la oportunidad de hacer la revisión e identificación en Madrid de las láminas de la Expedición Botánica de **Mutis**, las cuales en un tiempo record clasificó por familias, tribus y géneros siguiendo el sistema de **Endlicher**. Las mismas fueron agrupadas en carpetas, llevando cada una el número del género e incluyendo en su interior las especies representadas en cada caso. Además de catalogar las láminas, elaboró un índice y determinó a nivel de especie cerca del 30 % de ellas. Ya en 1866 había estado en Madrid haciendo gestiones al respecto, y en 1867 con la colaboración del médico **Eugenio Rampon** - quien años antes se había desempeñado como profesor en Bogotá, contribuyendo con decisión a la enseñanza de las ciencias naturales y médicas, ya en el laboratorio, y en el anfiteatro en su calidad de profesor, ya en la cabecera de los enfermos en el Hospital de Caridad - fotografió en 33 planchas las láminas de las quininas con las cuales ilustró la obra atrás citada.

Fiel a su formación médica, **Triana** aplicó muchos de sus conocimientos y observaciones de tipo etnobotánico en la elaboración de productos terapéuticos entre los cuales alcanzaron alguna popularidad el "Jarabe Triana", suave y eficaz antitusivo, el "Emplastro Andino" y el "Poudre Colombienne", polvo dentífrico para conservar y blanquear la dentadura. Fabricó además vino quinado y ensayó la producción de un vino estimulante con coca. Algunos de estos productos fueron patentados y el producto económico de los mismos le permitió sobrevivir complementando sus ingresos y enjugando los gastos generados por su numerosa familia. Aparte de lo anterior, dio a conocer bajo la denominación de "Verde Triana" a un colorante empleado por los indígenas de Cundinamarca, Boyacá y Nariño para teñir ruanas, mantas y bayetas. También promovió el uso de la coca como anestésico y contribuyó al descubrimiento de nuevos alcaloides como la Cinchonamida y la cocaína.

Siempre mostró interés en la propagación e incorporación al cultivo de especies útiles, especialmente

las quininas y las remijias, de las cuales proporcionó semillas para diversos ensayos en Argelia y en la India. Estos esfuerzos en descubrir y aprovechar nuevas sustancias le hicieron acreedor a premios y distinciones; de ellos el más notable fue el "Gran Premio" obtenido en la Exposición Universal de París de 1867, certamen en el cual exhibió su herbario destacando las especies medicinales e industriales y mostrando las amplias posibilidades de las fibras entretejidas.

Además de científico, **Triana** tuvo éxito como Cónsul General de Colombia en París, cargo que ocupó desde 1784 hasta su muerte acaecida el 31 de octubre de 1890. Simultáneamente con las labores del Consulado, dirigía la Biblioteca Escolar Suramericana, colección en la cual se editaron libros de diversa índole, entre ellos varias obras didácticas de la autoría de su padre. También colaboró en la edición de los resultados de la Comisión Corográfica, y por iniciativa propia organizó en tres oportunidades el Pabellón Colombiano en las Exposiciones Universales realizadas en París, a la vez que llevó la representación nacional en múltiples eventos culturales, congresos científicos y exhibiciones hortícolas.

Por la calidad y la magnitud de su obra, es **Triana** el más importante botánico sistemático colombiano de todos los tiempos. Su herbario es tal vez la colección más importante realizada en Colombia, ya que sin ser la más abundante en número de ejemplares, incluye una rica muestra de la flora colombiana. No obstante, la importancia de **Triana** como botánico no estriba en el número y la calidad de sus colecciones, sino en su notable capacidad de trabajo, en sus bastos conocimientos, en su juicio crítico, en la calidad de sus observaciones y en sus publicaciones. De los géneros y especies por él descritas, muy pocas han caído en la sinonimia; sus trabajos sobre botánica aplicada siguen teniendo vigencia y sus trabajos taxonómicos son colosales.

Cumplida satisfactoriamente su labor botánica, recompensada con distinciones, premios y condecoraciones, y lo que es más importante, aceptada por parte del mundo científico e intelectual, **Triana** cambió la vida austera del científico, por la vida social del diplomático; este hecho le permitió depender de ingresos fijos y suficientes, con lo cual pudo proporcionar una adecuada educación a sus hijos y gozar finalmente del bienestar que merecía tras una larga vida de austeridad y de no pocas privaciones.

A finales del siglo XIX y en el inicio del presente siglo se publicaron varias obras botánicas y algunas geografías con interesantes capítulos dedicados a la descripción de la vegetación de nuestra patria. Se mantenía así la tradición

de estudiar la naturaleza por parte de científicos o naturalistas que en más de un caso podríamos calificar como aficionados; sin embargo, dichos autores tienen el mérito, aparte de la calidad de sus escritos, de haberse esforzado en arraigar el cultivo de las ciencias, en un país agobiado por las conmociones civiles y por la inestabilidad política. Es en esta etapa en la que se desempeñan los dos personajes que completan nuestra reseña.

### Dos naturalistas por accidente. Cuervo y Cortés

Descendiente en línea directa de **Rufino Cuervo** y de **José Ignacio de Márquez**, **Carlos Cuervo Márquez** estaba llamado a convertirse en político y hombre público, como en efecto sucedió con el transcurso de los años. Lo que posiblemente jamás sospecharon sus padres, **Luis María Cuervo** y **Carolina Márquez** es que uno de sus hijos publicara algún día un libro titulado "Tratado elemental de Botánica", obra aparecida en 1913 y en la que además de varios capítulos de índole general y obviamente basados en otras obras, se destacan interesantes observaciones de primera mano sobre la distribución de las especies vegetales, sobre sus nombres vernáculos y sobre los usos populares dados a muchas de ellas en nuestro medio.

**Cuervo Márquez** nació en Bogotá el 2 de agosto de 1857, aunque en algunas obras aparece como fecha de su nacimiento el 1° de julio. Dadas su formación cultural y su capacidad intelectual pudo desempeñarse con igual éxito en los cargos públicos y en el periodismo. Además alcanzó el grado de General por su desempeño como militar en las contiendas civiles. De esta personalidad polifacética nos interesa recordar hoy, no al político que ocupó en propiedad o como encargado varios ministerios como los de Instrucción Pública, Relaciones Exteriores, Gobierno y Guerra, o la Gobernación de Cundinamarca y su Secretaría de Gobierno, ni al parlamentario que ocupó una curul en el Congreso de la República o una silla en la Asamblea de su Departamento; tampoco al diplomático que representó a su país ante la Santa Sede o ante Gobiernos como los de Argentina, Brasil, Venezuela, Cuba y México, ni al periodista que dirigió "El Imparcial" o "El Nuevo Tiempo"; tampoco al académico fundador de la Comisión de Historia y Antigüedades Patrias y Presidente de la Academia Colombiana de Historia. A quien queremos recordar es al estudioso que a pesar de sus múltiples ocupaciones, tuvo tiempo para cultivar la botánica y para incursionar en la geología, la arqueología y la etnografía, gracias al germen recibido en la Escuela de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional, en cuyas aulas encontró el estímulo necesario a su vocación de estudioso de la naturaleza, estudio que emprendió con entusiasmo desde su juventud y que continuó en el transcurso

de su vida, alternándolo con las campañas militares y con el desempeño de los cargos públicos y del servicio diplomático.

Este antecedente nos explica claramente, como un historiador erudito pudo escribir obras tales como "Prehistoria y Viajes", libro publicado en Bogotá en 1893 y reeditado en Madrid en 1920 bajo el título de "Estudios arqueológicos y etnográficos". Dicho libro en su versión corregida y aumentada recoge interesantes observaciones sobre San Agustín, Tierradentro, los indígenas paeces, los llanos orientales, la etnografía, el régimen altimétrico de la flora y las principales características de las civilizaciones chibcha y tairona. Igualmente interesante es el folleto "Las conmociones geológicas de la Epoca Cuaternaria en la Sabana de Bogotá y sus alrededores, publicado en 1923. Además de las obras atrás citadas son destacables sus artículos sobre el origen de los chibchas o sobre la etnografía americana.

**Carlos Cuervo Márquez** falleció en México el 11 de septiembre de 1930, cuando se desempeñaba como embajador ante dicha nación.

El último de nuestros personajes es el ingeniero y naturalista **Santiago Cortés Sarmiento**, quien nació en Bogotá el 1° de mayo de 1854 en el hogar formado por **José del Carmen Cortés** y **Pia Sarmiento**. De sus primeros años pocas noticias tenemos, salvo que fue su institutor el pedagogo **Casimiro Figueroa**; su educación se complementó en el Seminario Conciliar de Bogotá, donde alcanzó una buena educación humanística, destacándose como el más aventajado discípulo de griego y de latín de **Rufino José Cuervo**. Aficionado a las ciencias naturales, asimiló con facilidad cuanto texto llegó a sus manos, incluyendo obras en alemán, idioma que llegó a dominar. En 1874 ingresó a la Escuela de Ciencias Naturales donde cursó química, botánica, zoología, geología y mineralogía. Por un tiempo montó un laboratorio químico y promovió una Sociedad de Química e Historia Natural. También cursó Ingeniería en la Universidad Nacional.

Dadas sus dotes intelectuales y su capacidad, **Cortés** se desempeñó con éxito como catedrático de Historia Universal en el Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario de Bogotá y de Ciencias Naturales en el Seminario de Pamplona donde residió algunos años. En 1889 fue nombrado Rector del Colegio San Simón de Ibagué. De regreso a Bogotá se destacó como botánico y como lingüista. También ejerció la cátedra en las Facultades de Medicina e Ingeniería y en la Escuela de Comercio. Hizo también parte de la Oficina de Longitudes como fundador, y merced a sus conocimientos fue designado

para hacer parte de la Comisión de Límites con Venezuela, hecho que le dió oportunidad de recorrer bastas regiones fronterizas, particularmente la Guajira, las selvas del Catatumbo, el curso de este río y de algunos de sus afluentes, oportunidad que le permitió hacer interesantes observaciones que aplicó en sus publicaciones. Viajó además por el Quindío, el Tolima y el nororiente de Cundinamarca llegando hasta Mámbita y Medina.

Como botánico **Cortés** publicó un interesante libro que alcanzó dos ediciones (1897 y 1905) y en el cual sobresalen sus dibujos realizados en acuarelas tomadas del natural, sus observaciones sobre la utilidad terapéutica e industrial y una completa lista de fitónimos usados en el país. Se ha dicho que nuestro personaje copió la mayor parte de su información de las etiquetas del herbario de **Triana**, por coincidir muchos de sus datos; estas coincidencias se deben a que, como lo indica el propio **Cortés**, la parte industrial de su obra está escrita:

*“ ya sobre observaciones personales tomadas de nuestro herbario sobre las maderas, las fibras textiles y las substancias tintóreas; ya sobre estos datos sacados de los Botánicos que han estudiado nuestra flora como Humboldt y Bonpland, Kunth, Karsten, André, Weddell, Seeman, Triana, Bayón y otros: y de los que han escrito sobre las demás Floras Americanas, y al hecho de haber utilizado como base para el índice de nombres vulgares el “Vocabulario” que nuestro sabio compatriota Triana dejó en la Biblioteca Nacional de Bogotá pero que se ha corregido y aumentado notablemente con nuestros trabajos personales. No son nuestros índices copia inconsistente de otros libros.”*

Haciendo una evaluación podemos afirmar que la Flora de **Cortés** proporciona datos originales y que su enfoque es bastante propio, aunque sí se valió y en gran medida de la información acopiada por **Triana** y que estuvo en sus manos. Sus herbarios no tienen punto de comparación. Mientras el de **Triana** corresponde a una obra netamente sistemática y de indudable valor por su calidad en la preparación, preservación y novedad de contenido debido a las áreas visitadas para su conformación, lo que se conserva del de **Cortés** son pequeños fragmentos sin ningún tipo de información y tras los cuales no se aprecia ninguna labor sistemática. Sin embargo, **Cortés** pudo haber dispuesto de un buen herbario que no ha llegado a nuestros días y que pudo haber conformado durante sus viajes como integrante de la Comisión de Límites con Venezuela o durante sus

recorridos exploratorios por otras áreas del país. El libro comprende la Geografía botánica de Colombia, su memoria sobre las leguminosas, la Flora terapéutica e industrial, el catálogo de los nombres vulgares, un memorandum terapéutico y un índice de géneros y familias. En el prólogo, el autor agradece a varios naturalistas que le han facilitado sus bibliotecas y experiencias; entre ellos además de **Cuervo Márquez** y de **Vergara y Velasco**, aparecen dos de quienes fueron discípulos de **Bayón** en la Escuela de Ciencias Naturales y autores de algunas de las acuarelas del album ya mencionado. Aparentemente un segundo tomo de la Flora de **Cortés** no contó con suerte; su autor quiso publicarlo en Nueva York, con tan mala fortuna que el manuscrito pudo perderse al naufragar la nave que lo conducía, o en manos de un funcionario del Consulado Colombiano en dicha ciudad.

El padre **Pérez Arbeláez** constituye sin duda el eslabón que une la cadena de naturalistas que se inicia con **Mutis**, continúa con los integrantes de la Expedición Botánica, prosigue con **Triana** y con **Bayón**, se mantiene con **Cortés** y llega a nuestros días con el Instituto de Ciencias Naturales. En relación con **Cortés**, **Pérez Arbeláez** reconoce haberse aficionado a la botánica gracias a la lectura de sus obras. Al respecto dice: “*Las primeras lecciones botánicas que recibí las capté de muchacho en los escritos y en las colecciones de Santiago Cortés*”. Sin embargo al momento de calificarlas recuerda la siguiente anécdota: “*Tuve la debilidad de enseñarle a Karl von Goebel un herbario de teridófitas colombianas colectadas por mí en mis años de novato. El gran profesor era sarcástico, disimuladamente satírico y calificó así mi colección: “La dama que hizo este herbario tenía buen gusto”*. Es una calificación que hubiera podido aplicarse a toda la técnica sistemática de Santiago Cortés.”

Como hombre culto y con justo merecimiento, **Cortés** hizo parte del grupo de fundadores de la Comisión de Historia y Antigüedades Patrias que luego se convertiría en la Academia Colombiana de Historia, entidad en la que ocupó la silla número 9. Incursionó con éxito en la historia y en la lingüística, dejando como testimonio de su labor varios artículos publicados en el Papel Periódico Ilustrado, en el Boletín de Historia y Antigüedades y en la revista Renacimiento. Dejó además algunos apuntes sobre observaciones geológicas y paleontológicas y varias acuarelas, además de algunas muestras fósiles y que se conservan en museos de Europa. La muerte le sorprendió en Bojacá el 31 de enero de 1924.

Evidentemente, la obra de **Cortés** es incompleta y en extremo variada, pues abarca la botánica, la química, la paleontología, la geología y la lingüística. Tal vez por lo variada, adolece de cierto orden y de la metodología investigativa que sería de desear. Esta crítica no significa que no debamos contarle con suficientes méritos entre los cultores de la ciencia en Colombia y en particular de la botánica.

### **Bibliografía**

**Díaz-Piedrahita, S.** 1991. José Triana, su vida y su obra, en Díaz, S. (Ed). José Triana, su vida, su obra y su época. Academia Co-

lombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Enrique Pérez Arbeláez 5. Santafé de Bogotá.

\_\_\_\_\_. 1991 a. La botánica en Colombia, hechos notables en su desarrollo. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Enrique Pérez Arbeláez 6. Santafé de Bogotá.

**Ibáñez, P.M.** 1968. Memorias para la historia de la medicina en Santafé de Bogotá. Universidad nacional de Colombia, Bogotá. Segunda edición.

**Ortega-Ricaurte, E.** 1953. Bibliografía Académica. Academia Colombiana de Historia, Bogotá

**Vezga F.** 1971. La Expedición Botánica, Carvajal & Cía. Cali.

# ASPECTOS DE LA DINAMICA POBLACIONAL DE JAIBAS *Callinectes sapidus* Y *C. bocourti* DE LA CIENAGA GRANDE DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO (CRUSTACEA: DECAPODA: PORTUNIDAE)

por

Maria José Valencia<sup>1</sup> & Néstor Hernando Campos<sup>2</sup>

## Resumen

**Valencia, M.J. & N.H. Campos.:** Aspectos de la dinámica poblacional de Jaibas *Callinectes sapidus* Y *C. bocourti* de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano (Crustácea: Decápoda: Portunidae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 121-129, 1996. ISSN 0370-3908.

Con el fin de conocer el estado de explotación de las jaibas (*Callinectes sapidus* y *C. bocourti*) en la Ciénaga Grande de Santa Marta, se realizaron 33 muestreos en diferentes sitios, entre febrero de 1993 y enero de 1994; donde se capturaron 428 individuos de *C. bocourti* y 762 de *C. sapidus* y se hicieron 29 visitas a la comercializadora de Pueblo Viejo, donde se midieron 743 individuos de *C. bocourti* y 1117 de *C. sapidus*. Se determinó el ancho total y se obtuvieron las frecuencias de tallas para las dos especies. Los datos se procesaron con el programa FiSAT, se estimaron los parámetros de crecimiento ( $L_{\infty}$  y K). *C. sapidus* presentó el valor más alto de  $L_{\infty}$ , 17.5 cm y *C. bocourti* 14.8 cm. Los valores de K (coeficiente de crecimiento) fueron 1.15 y 1.3 respectivamente. La tasa de mortalidad total (Z) fue de 6.26 para *C. sapidus* y 5.78 para *C. bocourti* y por pesca (F) de 3.89 y 3.09 respectivamente. La tasa de explotación ( $E=F/Z$ ) fue de 0.62 para *C. sapidus* y 0.53 para *C. bocourti*. Estos valores se encuentran por debajo de la tasa de explotación óptima ( $E_{opt}$ ) que puede soportar actualmente el recurso (0.86 para *C. bocourti* y 0.84 para *C. sapidus*), lo cual permite concluir que actualmente ambas especies se encuentran subexplotadas.

**Palabras claves:** Jaibas - dinámica poblacional - lagunas costeras.

<sup>1</sup> Instituto de investigaciones marinas de Punta de Betín, INVEMAR. A.A. 1016 Santa Marta, Colombia.

<sup>2</sup> Instituto Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia, c/o INVEMAR. A.A. 1016. Santa Marta, Colombia.

### Abstract

33 samplings were accomplished between february 1993 and january 1994, in different sites of the CGSM; in these a total of 428 individuals of *C. bocourti* and 762 of *C. sapidus* were captured. In each site, water samples were taken to obtain salinity and temperature parameters. In addition 29 visits to the "Comercializadora de Pueblo Viejo" were made in order to get additional information and samples, a total of 743 individuals of *C. bocourti* and 1117 of *C. sapidus* were measured. For each animal total width were recorder, based on width parameters of captured individuals, size-classes frequencies were obtained for both species. This data were processed with the FiSAT Program (Fish Stock Assesment tools- FAO, ICLARM). Size-frequencies data of each species were compiled in ELEFAN 0 routine, growth parameters ( $L_{\infty}$  and K) were obtained by ELEFAN I routine. The mortality rate were estimated with ELEFAN II routine using the catch curve option. Total mortality rate (Z) was 6.26 for *C. sapidus* and 5.78 for *C. bocourti*; the fish mortality rate (F) was 3.89 and 3.09. The exploitation rates ( $E = F/Z$ ) was 0.62 for *C. sapidus* and 0.53 for *C. bocourti*. According to Beverton and Holt's maximum sustainable yield-per-recruit model, the values of the exploitation rates (E) obtained are under the optimum exploitation rate ( $E_{opt}$ ) wich the resource can tolerate at the present time (0.86 for *C. bocourti* and 0.84 for *C. sapidus*), these results suggest that nowadays both species are being underexploited in the CGSM.

**Key words:** Swimming crabs - population dynamics - coastal lagoon.

### Introducción

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) es la laguna costera más grande del país y se caracteriza por ser un sistema fluctuante debido a los cambios en las condiciones fisicoquímicas por las descargas cíclicas de los ríos que allí drenan, como el río Magdalena y las procedentes del piedemonte de la Sierra Nevada de Santa Marta. Esta condición fluctuante se refleja también en la entrada permanente de material alóctono, que junto con el aporte autóctono, como el de los manglares la convierte en una zona de muy alta productividad.

Alrededor de la Ciénaga se localizan varios asentamientos humanos, que dependen directamente de la producción pesquera. **Botero y Botero** (1989) reportaron una disminución tanto en la abundancia como en las tallas de los recursos pesqueros.

Para la determinación del grado de explotación de cualquier recurso renovable que está siendo sometido a la extracción permanente, es necesario conocer su dinámica poblacional (parámetros de crecimiento, tasas de mortalidad y reclutamiento). Al no tenerse este conocimiento el recurso puede llegar a ser sobreexplotado.

Las jaibas del género *Callinectes* Stimpson constituyen un alimento de agradable sabor y alto valor comercial, lo cual hace que tengan gran demanda (**Lasso & Ordóñez**, 1987), y en la CGSM es uno de los recursos

que recientemente está siendo tomado en cuenta para su aprovechamiento, por lo tanto se hace necesario realizar un estudio sobre la dinámica poblacional para evaluar su grado de explotación.

Se realizó una evaluación del grado de explotación pesquera de las jaibas *Callinectes sapidus* (jaiba azul) y *C. bocourti* (jaiba roja) a través del estudio de algunos aspectos de la dinámica poblacional, como los parámetros de crecimiento, las tasas de mortalidad, la tasa de explotación, el reclutamiento y rendimiento máximo sostenible que puede generar el recurso.

### Materiales y métodos

Para la recolección de las jaibas se realizaron muestreos quincenales durante un año (febrero de 1993 y enero de 1994), para un total de 24 salidas de campo. Las muestras se agruparon por meses.

Se tuvieron en cuenta dos tipos de colecta: La primera se hizo en la comercializadora de jaibas de Pueblo Viejo (CGSM) con un total de 29 visitas y la segunda en la CGSM con una red de arrastre de fondo (90 cm ancho, 34 cm de alto, 3.50 m de largo y 7 mm de ojo de malla), en cinco estaciones de la ciénaga (Boca de la Barra, Desembocadura del río Fundación, Caño Grande, Barra Vieja y Rincón del Jagüey). Se incluyen además muestreos esporádicos en otras zonas de la CGSM.

Las jaibas colectadas en los arrastres se transportaron en una nevera de estereopor en frío al INVEMAR, donde fueron medidas, pesadas, sexadas y determinado el grado de madurez. En la comercializadora, las determinaciones se hicieron directamente en el lugar, y el número de individuos se estableció con base en una muestra al azar de las capturas que llegaban a la pesquera (Bazigos, 1975).

En el presente trabajo se optó por usar el ancho del caparazón como dimensión para el estudio de los parámetros de crecimiento, ya que en las pocas referencias sobre dinámica poblacional de jaibas, utilizan esta medida (Pineda *et al.*, 1992 y Escobar & Giraldo, 1993).

Para el estudio de la dinámica poblacional se recurrió al programa FiSAT (Fish Stock Assessment Tools, FAO-ICLARM) (Pauly & Sparre, 1991). Los datos de frecuencia de tallas, agrupados en intervalos de 0.5 cm, se almacenaron mediante la rutina ELEFAN 0. Se estimaron los parámetros de crecimiento de la ecuación de Von Bertalanffy: Ancho asintótico (L) y coeficiente de crecimiento (K) utilizando la rutina ELEFAN I. Con base en las diferentes rutinas de ELEFAN I se determinó la mejor combinación de los parámetros de crecimiento (L y K), es decir el mejor ajuste de los datos disponibles o mejor Rn. El modelo de crecimiento alométrico está dado por la ecuación:

$$L_t = L_{\infty} (1 - e^{-(k(t-t_0))})$$

donde  $L_t$  = Longitud en el tiempo t

$L_{\infty}$  = Longitud asintótica

K = Coeficiente de crecimiento

$t_0$  = Tiempo inicial (parámetro de condición inicial equivalente a la edad teórica de la longitud 0)

Como el crecimiento es oscilatorio, el modelo está dado por la ecuación de crecimiento estacionalizada de von Bertalanffy (Pauly y Gaschutz, en Pineda, 1992).

$$L_t = L_{\infty} (1 - e^{-(K(t-t_0) - (C \cdot K / 2\pi) \cdot \text{Sen } 2\pi(t-t_s))})$$

donde C: Constante de amplitud en la oscilación del crecimiento, varía entre 0 y 1.

$t_s$ : Punto de partida de la oscilación del crecimiento. Está dado por la ecuación  $t_w = t_s + 0.5$

$t_w$  = Winter point ( $W_p$ )

( $W_p$ ): Fracción del año donde el crecimiento es menor.

La tasa de mortalidad total (Z) se estimó mediante las rutinas de ELEFAN II, empleando el método de la curva de captura. A partir de estas estimaciones se obtuvieron las tasas de mortalidad natural (M), mortalidad por pesca (F) y la tasa de explotación ( $E = F/Z$ ) (Pauly, 1983a).

La tasa de mortalidad natural se calculó a partir de la ecuación empírica de Pauly (1983a):

$\text{Lg } M = -0.0066 - (0.279 \text{ lg } L_{\infty}) + (0.6543 \text{ lg } K) + (0.4654 \text{ lg } T)$  en donde:

$L_{\infty}$  y K son los parámetros de crecimiento de von Bertalanffy

T = Temperatura media anual en °C del agua superficial del agua donde habita el recurso

Con estos datos se calculó la tasa de explotación (E):

$$E = F/Z$$

Si  $E = 0.5$ , se considera un valor óptimo de pesca. (Gulland, 1977; Pauly, 1983a).

La longitud de captura ( $L_c$  o  $L_{50}$ ) fue estimada a partir de la ecuación de curva de captura convertidas en longitud, mediante la rutina ELEFAN II, empleando la opción probabilidad de captura (Pauly, 1984b).

El patrón de reclutamiento se obtuvo mediante la rutina del FiSAT para tal fin, empleando L y K, con base en un tiempo relativo de un año, es decir tomando  $t_0 = 0$  (Pauly, 1986).

La tasa de explotación óptima se estimó a partir del modelo de rendimiento máximo sostenible de Beverton y Holt (García & Le Reste, 1986; Sparre *et al.*, 1989), asumiendo una selección del tipo "Knife edge" o "filo de cuchillo" con base en los parámetros de crecimiento, la mortalidad natural y la talla de captura ( $LC_{50}$ ) (Sparre, *et al.*, 1989).

Para comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo, con los de Escobar y Giraldo (1993), se utilizó adicionalmente la ecuación dada por Munro y Pauly (1983) y modificada por Sparre *et al.* (1989):

$$\phi' = \ln K + 2 \ln L$$

Donde:  $L_{\infty}$  y K son los parámetros de crecimiento de von Bertalanffy

## Resultados y Discusión

Para *Callinectes sapidus* se midieron 1117 individuos en la comercializadora, las tallas más frecuentes (más de 10 individuos) variaron entre 8.00 y 13.5 cm de ancho. Para *C. bocourti* se midieron 743 individuos y las tallas oscilaron entre 7.5 y 11.5 cm de ancho en ambos sexos (Tabla 1).

Durante las faenas de pesca se capturó un total de 762 individuos de *C. sapidus* y 428 de *C. bocourti*, no encontrándose tendencia marcada a una mayor abundan-

**Tabla 1.** Frecuencia de tallas (ancho cm) medidas para los ejemplares de las especies *Callinectes sapidus* y *C. bocourti* colectados en el centro de acopio y en las faenas de pesca durante doce meses de muestreo (febrero de 1993 y enero de 1994).

Tallas (Ancho cm)	<i>C. sapidus</i>		<i>C. bocourti</i>	
	Centro de acopio	Faenas de pesca	Centro de acopio	Faenas de pesca
2.0		1		
2.5		1		
3.0		2		1
3.5		2		
4.0		7		1
4.5		4		2
5.0		2		2
5.5		10		2
6.0	1	12		4
6.5	1	20		6
7.0		32	3	21
7.5	10	42	14	26
8.0	28	54	60	49
8.5	46	64	77	63
9.0	104	71	110	61
9.5	115	77	178	68
10.0	166	82	130	53
10.5	120	86	102	40
11.0	139	72	43	15
11.5	117	49	15	8
12.0	121	34	5	
12.5	79	14	3	2
13.0	39	9	2	4
13.5	18	8		
14.0	7	6		
14.5	4	1		
15.0	2			
<b>TOTAL</b>	<b>1117</b>	<b>762</b>	<b>743</b>	<b>428</b>

cia con una talla determinada, como en los muestreos en la comercializadora (Tabla 1), ya que este muestreo permitió la colecta de individuos de tallas, incluyendo las menores.

A partir de las determinaciones morfométricas de los ejemplares capturados en los arrastres realizados, se obtuvo la información sobre la frecuencia por clases de tamaño con base en el ancho del caparazón. Con esta información se calcularon los parámetros poblacionales (Tabla 2).

Los valores de C y Wp obtenidos fueron los que permitieron un mejor ajuste de las curvas de crecimiento a las frecuencias de tallas.

*C. sapidus* presentó el valor más alto del ancho infinito (L 17.5 cm), mientras que para *C. bocourti* fue de 14.8 cm. Los valores de K se invirtieron siendo mayor en *C. bocourti* que en *C. sapidus* (1.3 y 1.15 respectivamente).

La figura 1a muestra la curva de crecimiento de *C. sapidus*, destacándose la existencia de una cohorte para el período anual de febrero de 1993 a enero de 1994, y está representada mensualmente por un determinado grupo de edad. En la figura 1b se observa la curva de crecimiento para *C. bocourti*, sobresaliendo también la presencia de una cohorte para el mismo período anual. Se puede observar que el crecimiento para ambas especies presenta variaciones a lo largo del período de muestreo dependiendo del punto de invierno (Wp) que fue de 0.93 para *C. sapidus* y de 0.6 para *C. bocourti* y de la amplitud (C) que fue de 0.6 para ambas especies. Lo anterior indica que *C. sapidus* y *C. bocourti* presentan entre noviembre y diciembre y entre julio y agosto respectivamente, una disminución del crecimiento aproximadamente de un 60% (dado por C).

*C. sapidus* presenta el mayor valor para el ancho infinito (L = 17.5 cm), mientras que en *C. bocourti* fue de 14.8 cm. El valor de K es contrariamente al de L mayor en la segunda especie (1.3 y 1.15 respectivamente).

El crecimiento para *C. sapidus* y *C. bocourti* fluctúa a lo largo del período de muestreo presentando variaciones que dependen de la época del año, con un período en el que el crecimiento es más lento (Wp), debido tal vez a cambios en el medio ambiente, por migraciones asociadas al desarrollo o por variaciones en la disponibilidad del alimento (Pauly y Gaschutz en Pineda, 1992).

La ecuación de crecimiento oscilatorio para *C. sapidus* sería entonces:



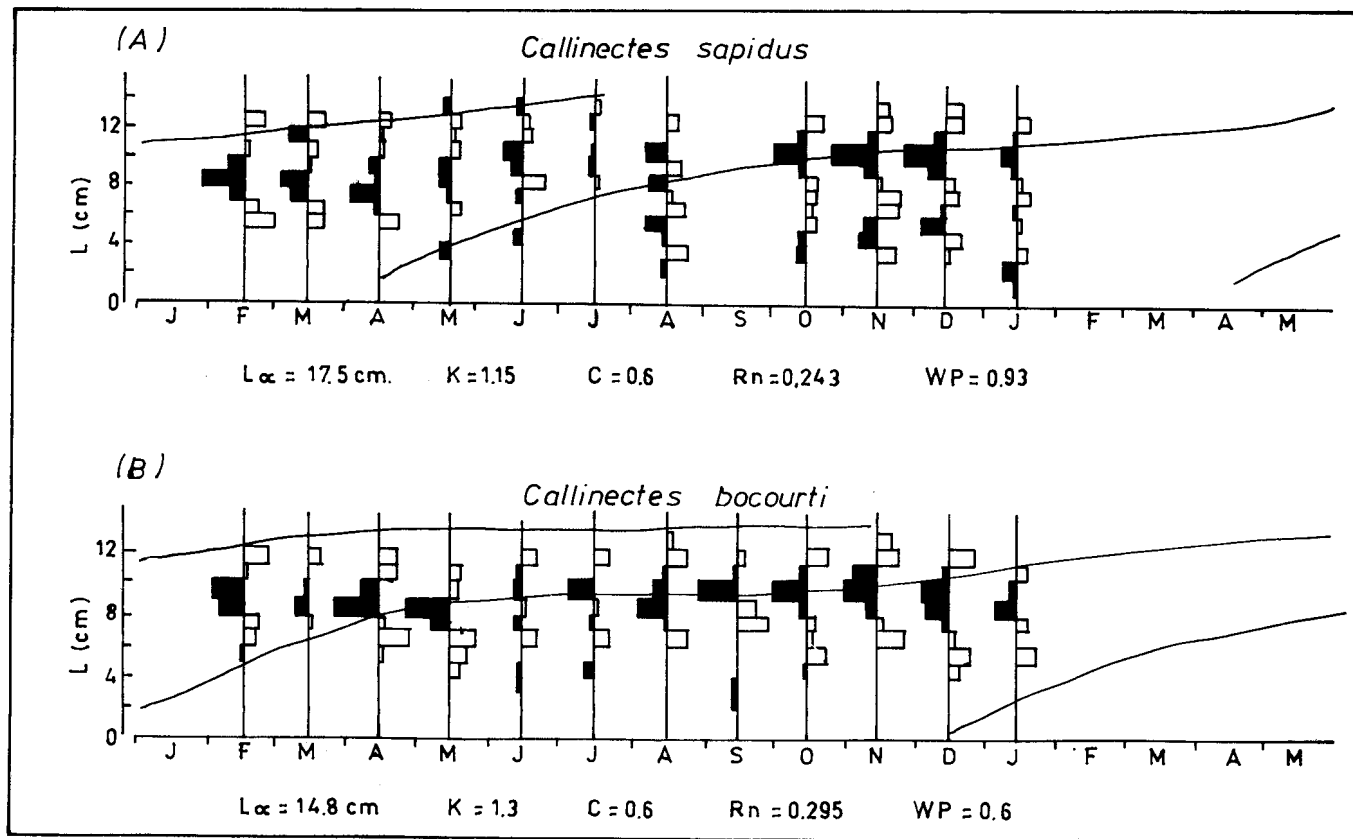


Figura 1. Distribución mensual de frecuencias de tallas para individuos de *Callinectes sapidus* y *C. bocourti* con las curvas de crecimiento estimadas a partir de ELEFAN I. Se dan los valores de  $L_{\infty}$  = Longitud infinita (cm), K = coeficiente de crecimiento, Rn = Índice de ajuste óptimo que identifica los parámetros de crecimiento que representan mejor a la población, WP = winter point y C = amplitud.

$$L_t = 17.5 \{ 1 - e^{-1.15(t-0.16)} - 0.6(1.15/6.28) \sin 6.28(t-0.43) \}$$

y para *C. bocourti* es:

$$L_t = 14.8 \{ 1 - e^{-1.3(t-0.89)} - 0.6(1.3/6.28) \sin 6.28(t-0.1) \}$$

Los valores de mortalidad por pesca para *C. sapidus* y *C. bocourti* son 3.89 y 3.09 respectivamente; contrariamente la mortalidad natural fue mayor en *C. bocourti* que en *C. sapidus* (2.69 y 2.37 respectivamente) (Fig. 2). Esto se atribuye posiblemente, a la velocidad con que alcanza el L (medido como factor de crecimiento), es decir, las especies con un alto valor de K tienden a tener una más alta mortalidad natural, en relación con las de menor coeficiente de crecimiento (Beverton & Holt, en Sparre *et al.*, 1989). La mortalidad natural también está ligada a L o al W (peso infinito), ya que los individuos grandes tienen menos depredadores que los pequeños (Sparre *et al.*, 1989). Considerando los valores de F y M se tiene entonces, que la tasa de mortalidad total es ma-

yor en *C. sapidus* que en *C. bocourti* (6.26 y 5.78 respectivamente).

En las figuras 2a y 2b, se observan las curvas de capturas para ambas especies, las cuales se realizaron convirtiendo las longitudes a edades y trazando un gráfico con el valor del logaritmo natural del número (N) de individuos en la muestra ( $\ln N/\delta t$ ), contra su respectiva edad relativa. Se consideraron únicamente aquellos valores de  $\ln N$  que correspondan a las clases de edad que son reclutadas al arte de pesca, es decir, para la estimación de Z se utilizó únicamente la parte descendente de esta curva. En la parte superior de la parte ascendente de la curva (cuadrados) se puede observar una proyección del número de individuos que existieron en determinado momento del pasado (puntos empleados para la estimación de  $L_c$ ) (Pauly, 1983b y 1984a). El valor de  $L_c$  representa la talla promedio a la cual el 50% de los individuos muestreados son retenidos por el arte de pesca (Sparre *et al.*, 1989).

Con las tasas de mortalidad se determinaron las tasas de explotación (E) para cada una de las especies, estos valores son 0.53 para *C. bocourti* y 0.62 para *C. sapidus*. Además con base en los parámetros de crecimiento, la mortalidad natural y la longitud de captura, y a partir del modelo del máximo rendimiento por recluta de Beverton y Holt se pudo estimar la tasa de explotación óptima (Eopt) o máximo rendimiento que pueden soportar actualmente las especies de *C. sapidus* y *C. bocourti* (Eopt= 0.84 y Eopt= 0.86 respectivamente).

Escobar y Giraldo (1993) con el fin de estimar los parámetros poblacionales de *C. sapidus* y *C. bocourti* utilizaron el programa COMPLEAT ELEFAN. Este programa, al igual que el FiSAT emplea las mismas rutinas para el cálculo de los parámetros poblacionales (crecimiento, mortalidad y tasas de explotación). En la tabla 2 se comparan los resultados obtenidos por estos autores y el presente.

Las diferencias numéricas entre los resultados de los dos estudios, se debe probablemente al número de muestras obtenidas en cada uno, otra posible causa de estas divergencias puede ser la duración del período de muestreo (seis meses y un año). Ambos trabajos coinciden en que *C. sapidus* tiende a llegar a tallas mayores que *C. bocourti* presentando un mayor valor de L, lo mismo que para el coeficiente de crecimiento, que es mayor en la segunda especie.

Se observa un incremento en la tasa de explotación para las dos especies entre el trabajo de Escobar y Giraldo (1993) y el presente, posiblemente debido al aumento del esfuerzo pesquero en el último año.

Finalmente el indicador  $\phi'$  muestra diferencias entre uno y otro trabajo, a pesar de ser pequeñas, pero de acuerdo a lo mostrado por Sparre *et al.* (1989) en la figura 3.7.1., en donde los valores de  $\phi'$  para diferentes curvas de crecimiento debe ser igual, corrobora las diferencias encontradas para los parámetros de crecimiento.

La figura 3 muestra las curvas de rendimiento por recluta (R/Y) (3a y 3c) y biomasa por recluta (B/Y) (3b y 3d) para *C. sapidus* y *C. bocourti* respectivamente. La curva R/Y (Figs. 3a y 3b) muestran el rendimiento máximo sostenible que puede dar cada una de las dos especies. Se observa que las tasas de explotación se encuentran por debajo de aquellas que genera el máximo rendi-

**Tabla 2.** Comparación de los valores obtenidos para los parámetros poblacionales de *Callinectes sapidus* y *C. bocourti* de la Ciénaga Grande de Santa Marta entre el trabajo de Escobar & Giraldo (1993) y el presente estudio.  $L_{\infty}$  = Longitud infinita (cm), K= coeficiente de crecimiento, Rn= Índice de ajuste óptimo que identifica los parámetros de crecimiento que representan mejor a la población, Z= mortalidad total, M= mortalidad natural, F= mortalidad por pesca, E = tasa de explotación: F/Z, WP= winter point y C= amplitud.

AUTOR	ESCOBAR & GIRALDO, 1993		PRESENTE ESTUDIO	
	<i>C. sapidus</i>	<i>C. bocourti</i>	<i>C. sapidus</i>	<i>C. bocourti</i>
$L_{\infty}$	15.00	11.80	17.50	14.80
K	1.20	1.42	1.15	1.30
Rn	0.109	0.220	0.243	0.295
Z	5.578	5.422	6.26	5.78
M	2.505	2.991	2.37	2.69
F	3.073	2.431	3.89	3.09
E= F/Z	0.551	0.448	0.62	0.53
WP	0.60	0.54	0.93	0.60
C	0.60	0.50	0.60	0.60
$\phi$	5.60	5.30	5.80	5.70

miento por recluta (0.84 para la primera y 0.86 para la segunda especie), es decir, que ambas especies soportan un incremento del esfuerzo pesquero para llegar al óptimo de pesca. Las curvas de B/R (Figs. 3c y 3d) disminuyen siempre que el esfuerzo aumenta, estando esta curva en relación inversa con la captura por unidad de esfuerzo. En este caso corresponde a la biomasa de la parte explotada de la cohorte.

Con base en las tasas de explotación, Escobar y Giraldo (1993) concluyeron que *C. sapidus* presenta una ligera sobrepesca, el valor se encuentra por encima del óptimo (E= 0.5) y *C. bocourti* presentó un menor valor, cercano al óptimo de pesca. Sin embargo, no estimaron el rendimiento por recluta del Modelo de Beverton y Holt, el cual nos permite predecir cuál es la tasa de explotación óptima que puede soportar determinado recurso, por lo tanto las evaluaciones de estos autores no son suficientemente justificadas para llegar a dichas conclusiones. Tomando en cuenta estos resultados (E= 0.62 y Eopt= 0.84 para *C. sapidus*; E= 0.53 y Eopt= 0.86 para *C.*

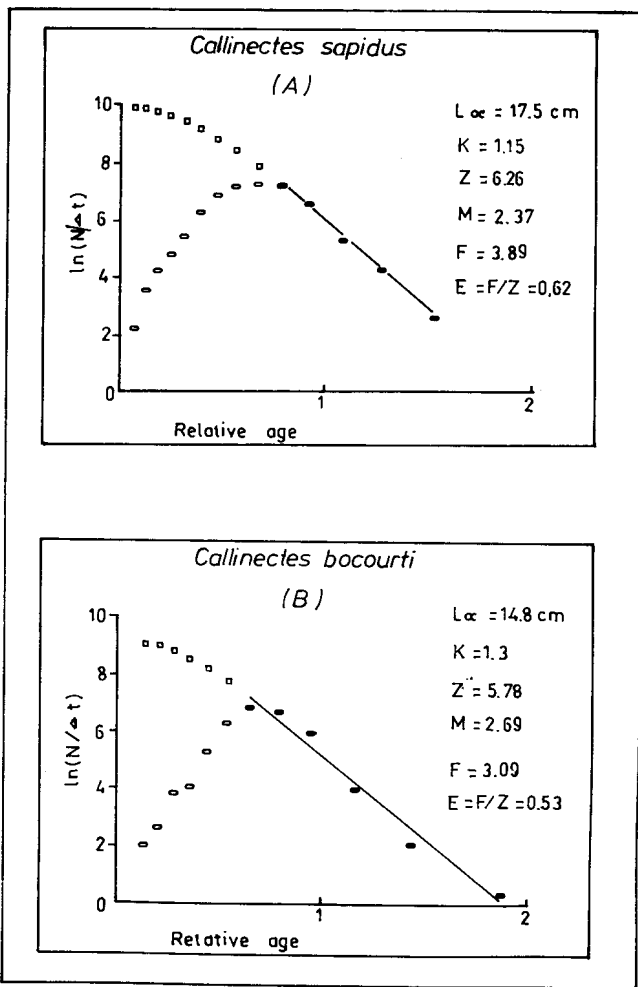


Figura 2. Curvas de captura con base en la frecuencia de tallas para individuos de *Callinectes sapidus* (A) y *C. bocourti* (B).

*bocourti*) se puede decir que el recurso de la jaiba en la CGSM está subexplotado, ya que los valores de las tasas de explotación obtenidos para ambas especies se encuentran por debajo de la tasa de explotación óptima que el recurso puede soportar actualmente.

Mediante la rutina ELEFAN II a partir de los parámetros de crecimiento se estimó la estacionalidad del reclutamiento en un stock utilizando la rutina "Patrón de reclutamiento". Los períodos o pulsos de reclutamiento se determinaron con respecto a un tiempo relativo de un año. Para *C. sapidus* se observaron dos pulsos mayores de reclutamiento al año, uno máximo en abril (14.4 %) que corresponde al mes de máxima salinidad, seguido de otro en el mes de agosto (12.13 %), que a pesar de ser un mes de baja salinidad corresponde al final de la época seca intermedia o "veranillo de San Juan"

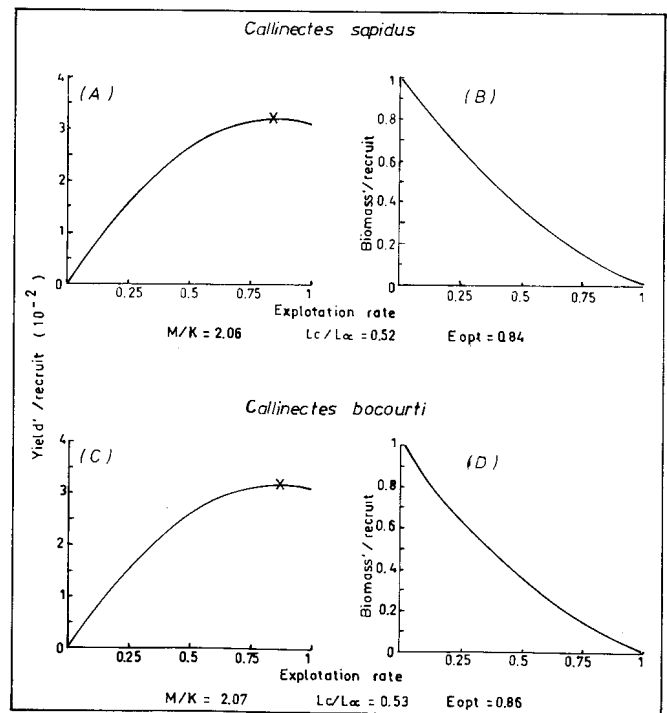


Figura 3. Rendimiento por recluta (Y/R) y biomasa por recluta (B/R) para *Callinectes sapidus* (A y B) y *C. bocourti* (C y D) a partir del modelo de Beverton y Holt calculado con el programa ELEFAN.

(Fig. 4a). Estos picos de reclutamiento se presentaron luego de los meses de alto porcentaje de presencia de hembras ovadas (Valencia y Campos, 1995), y se redujeron al siguiente mes, lo que indica que probablemente ocurre un desove en estos meses. Al parecer *C. bocourti* presenta un reclutamiento anual, en el mes de julio (22.97%), que corresponde al período de la época seca intermedia (Fig. 4b); no se observa ninguna relación con la salinidad. Durante ese período ocurre probablemente un desove luego del mes de mayo, cuando se observó el mayor porcentaje de hembras ovadas.

El reclutamiento y el desove se relacionan de alguna manera, ya que el ingreso de nuevos individuos a una población explotable se manifiesta a través del reclutamiento. Este es uno de los principales factores que intervienen en la dinámica de poblaciones de cualquier recurso pesquero, y se puede convertir en la causa de las mayores fluctuaciones de sus poblaciones. En toda población hay una cierta cantidad de individuos que se reproducen cada año y son los encargados de producir la cantidad suficiente de huevos, como para que ingrese un número suficiente de organismos que permitan repoblar el espacio dejado por aquellos muertos (Csirke, 1980).

**Tabla 3.** Mortalidad total (Z), mortalidad natural (M), mortalidad por pesca (F), tasa de explotación (E= F/Z), Probabilidad de captura (Lc) para los ejemplares de *Callinectes sapidus* y *C. bocourti* determinados en el centro de acopio con base en las frecuencias de tallas. CI= intervalo de confianza para Z.

ESPECIE	<i>C. sapidus</i>		<i>C. bocourti</i>	
	C. acopio	Faena de pesca	C. acopio	Faena de pesca
$L_{\infty}$	17.5	17.5	14.8	14.8
K	1.15	1.15	1.3	1.3
Z	6.61	6.26	6.18	5.78
M	2.37	2.37	2.69	2.69
F	4.24	8.89	3.49	3.09
E= F/Z	0.64	0.62	0.56	0.53
Lc	9.60	9.20	7.92	7.93
CI	7.86-5.36	6.89-5.63	7.90-4.47	7.12-4.45

Para corroborar los resultados obtenidos con los datos de frecuencias de longitud observadas en los doce meses de muestreo de las dos especies, con los generados a partir de las tallas medidas en el centro de acopio, empleando los mismos parámetros de crecimiento ( $L_{\infty}$  y K), se procedió a estimar las tasas de mortalidad, la tasa de explotación y la probabilidad de captura. Los resultados obtenidos fueron muy similares, lo cual reafirma la validez de la toma de muestra (Tabla 3) y que los dos muestreos son comparables o similares.

En efecto, el valor de Z fue mayor en *C. sapidus* que en *C. bocourti* (6.61 y 6.18 respectivamente), los valores de F son 4.24 para *C. sapidus* y 3.49 para *C. bocourti*, las tasas de explotación determinadas para cada una de las especies fueron de 0.64 y 0.56, respectivamente. A pesar de que los valores de Z para las dos especies son ligeramente diferentes a lo encontrado en las muestras de la red de arrastre, se pudo comprobar que no son significativamente diferentes, comparando los intervalos de confianza estimados a partir de las respectivas curvas de captura para los valores de Z de los dos muestreos, los cuales se traslapan (Sokal y Rohlf, 1981).

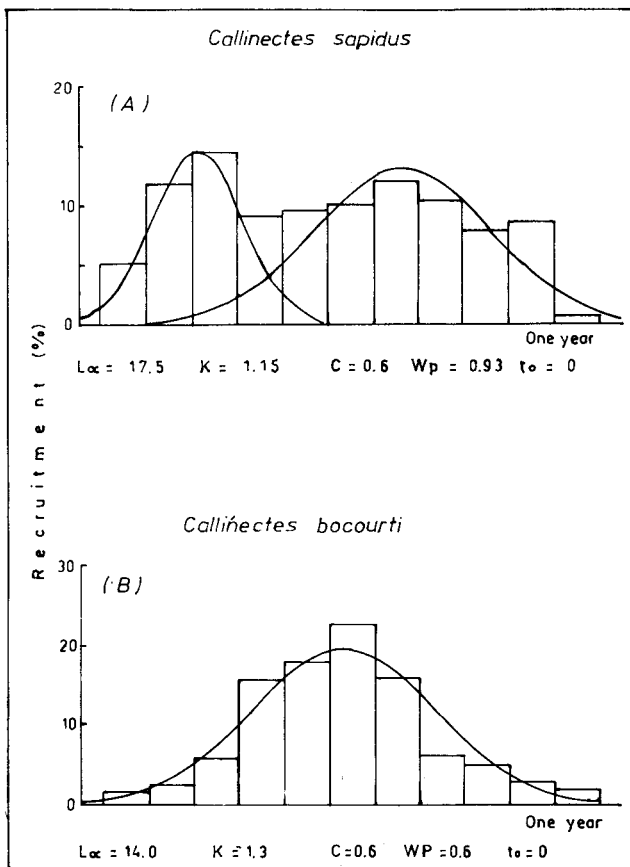
Se observó mediante los dos muestreos, que los valores de Lc son similares tanto para *C. sapidus* como para *C. bocourti*, los cuales corresponden a la talla de primera captura donde el 50% de los individuos muestreados son retenidos por el arte de pesca (Pauly, 1983a).

#### Agradecimientos

El presente estudio fue financiado por COLCIENCIAS, el INVEMAR y la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia. Expresamos nuestros agradecimientos a J. Mendo, R. Giraldo y R. Madera por su colaboración en la parte analítica y de procesamiento de la información; a L. M. Manjarrés por su aporte revisando el documento y a P. Hernández por facilitarnos información del centro de acopio de Pueblo Viejo. COLCIENCIAS financió el viaje de uno de los investigadores (NHC) a la reunión de verano de Crustáceos.

#### Bibliografía

- Bazigos, G.P. 1975. Esquema de encuestas sobre estadísticas de pesca-guas continentales. FAO. Doc. Tec. Pesca, 133: 159 p.
- Botero, J.E. & L. Botero. 1989. Problemática Ambiental del sistema de Ciénaga Grande de Santa Marta. Delta Exterior del río Magdalena: 11-28. En: J.E. BOTERO & BOTERO, L., A. PATIÑO & GARCIA, G. 1989. Colombia y el agua. Tres aspectos: La Ciénaga Grande



**Figura 4.** Patrón de reclutamiento anual para *Callinectes sapidus* (A) y *C. bocourti* (B).

- de Santa Marta, la Laguna de Sonso y la Conferencia del Mar de Plata. Fescol. Ediciones Lerner Ltda. Bogotá, D.E., 78 p.
- Csirke, J.** 1980. Introducción a la Dinámica de poblaciones de peces. FAO. Doc. Tec. Pesca 192: 82 p.
- Escobar, M. R. & J.O. Giraldo.** 1993. Evaluación de la captura de jaibas (*Género Callinectes*) con nasas y otros artes en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. Tesis Univ. del Magdalena. Santa Marta, 115 p.
- García, S. & L. Le Reste.** 1986. Ciclos vitales, dinámica, explotación y ordenamiento de las poblaciones de camarones peneidos costeros. FAO. Doc. Tec. Pesca, 203: 180 p.
- Gulland, J.A.** 1977. Fish population dynamics. Ed. Jonh Wiley & sons, Ltd. Chichester, 372 p.
- Lasso, P. & V. Ordóñez.** 1987. Contribución al estudio biológico-pesquero de las jaibas (*Callinectes*) de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. (Crustacea: Decapoda: Portunidae). Tesis Univ. Nal., Colombia, Bogotá, 63 p.
- Munro, J. L. & D. Pauly.** 1983. A simple method for comparing the growth of fishes and invertebrates. ICLARM, Fishbyte 1 (1): 5-6.
- Pauly, D.** 1983a. Algunos métodos simples para le evaluación de recursos pesqueros tropicales. FAO. Doc. Tec. Pesca, 234: 49 p.
- \_\_\_\_\_. 1983b. A lenght-converted catch curves: A powerful tool for fisheries research in the tropics. (Part I). Fishbyte 2(2): 9-13.
- \_\_\_\_\_. 1984a. A lenght-converted cath curves: A powerful tools for fisheries research in the tropics (Part II). Fishbyte 2(1): 17-19.
- \_\_\_\_\_. 1984b. A lenght-converted catch curves: A powerful tool for fisheries research in the tropics. (Part III: Conclusion). Fishbyte 2(3): 9-10.
- \_\_\_\_\_. 1986. On improving operation of the ELEFAN programs. Part III. Correcting Length-frequency data for the effects of gear selection and/or incomplete recruitment. Fisbyte 4(2): 11-13.
- \_\_\_\_\_. & **P. Sparre.** 1991. A note of the development of a new software package, the FAO-ICLARM. Stock Assesment Tools (FiSAT). Fishbyte 9(1): 47-49.
- Pineda, F.H.** 1992. Biología y dinámica poblacional del camarón de aguas someras *Penaeus occidentalis* Streets, durante el año 1991, en la Costa Pacífica colombiana. En: Memorias VIII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar. Octubre 26-30. Santa Marta- Colombia.; 782-796.
- \_\_\_\_\_. **Madrid, N. & F.H. Pineda.** 1992. Contribución al conocimiento de la dinámica poblacional de la jaiba *Callinectes arcuatus* Ordway en el Pacífico colombiano. En: Memorias VIII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar. Octubre 26-30. Santa Marta- Colombia.; 852-858.
- Sokal, R. & F.J. Rohlf.** 1981. Biometry. The principles and practice of statistics in biological research. W.H. Freeman and company. New York. 859 p.
- Sparre, P., Ursin E. & S.C. Venema.** 1989. Introduction to tropical fish stock assessment. Part 1. Manual. FAO. Fish. Tech. Paper., 306, 333 p.
- Valencia, M.J. & N.H. Campos** 1995. Aspectos biológicos de las jaibas *Callinectes sapidus* y *C. bocourti* de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano (Crustacea: Decapoda: Portunidae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 19 (75): 733-739.

# A HISTORICAL PERSPECTIVE TO *Simulium (Ectemnaspis)* AND *Simulium (Psilopelmia)* LIMITS

by

Daniel Rafael Miranda Esquivel<sup>1</sup> and Paulina Muñoz de Hoyos<sup>2</sup>

## Resumen

Miranda Esquivel, D. R. & P. Muñoz de Hoyos.: A historical perspective to *Simulium (Ectemnaspis)* and *Simulium (Psilopelmia)* limits. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 131-140, 1996. ISSN 0370-3908.

Los límites de los subgéneros de la familia Simuliidae han cambiado a lo largo del siglo. Esos límites están basados en diferentes perspectivas sobre grupos, caracteres y marcos teóricos. Actualmente la dificultad para definir los límites de especies entre *Simulium (Ectemnaspis)* y *Simulium (Psilopelmia)* se genera a partir de dos propuestas: Coscarón (1984, 1987, 1990, 1991) y Crosskey (1987, 1990). Esta controversia puede ser resuelta al usar un enfoque filogenético para crear un marco de corroboración de los límites entre los subgéneros.

**Palabras claves:** Simuliidae - filogenia - *Ectemnaspis* - *Psilopelmia*.

## Abstract

Taxonomic limits between subgenera of the Simuliidae have changed throughout this century. Some of the difficulties in defining the subgenera *Simulium (Ectemnaspis)* and *Simulium (Psilopelmia)* arise from differing perspectives about the groups, the use of different sets of characters, and/or the application of different theoretical frameworks to study them. Of particular importance in this connection are the opposing points of view presented by Coscarón (1984, 1987, 1990, 1991) and Crosskey (1987, 1990). The controversy can be resolved with the use of a phylogenetic approach which provides an effective method to clarify the limits between subgenera.

**Key words:** Simuliidae - phylogeny - *Ectemnaspis* - *Psilopelmia*.

<sup>1</sup> Escuela de Biología. U.I.S. A.A. 678 Bucaramanga. COLOMBIA.e-mail: dmiranda@uiscol.uis.edu.co

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional. A.A. 7495 Santafé de Bogotá. COLOMBIA.e-mail: pamunoz@ciencias.pcampus.unal.edu.co

"It is the objective of phylogenetic systematics to discover these [supraspecific] taxa and either name them or make their presence immediately apparent."

Wiley (1981:70)

## Introduction

Simuliidae is a well known family since some of its members are *Onchocerca / Mansonella* vectors or pests due to their biting activity (Crosskey, 1990) or interesting from an ecological perspective (Cummins, 1987). Their economic and scientific importance notwithstanding, the taxonomy of the family is not clearly understood and there remain many taxonomic problems to be solved at the generic, subgeneric and specific levels.

For the purposes of this study we have chosen *Simulium (Ectemnaspis)* and *Simulium (Psilopelmia)*, but this situation could be extended to all neotropical Simuliidae. The main difficulty arises from the existence of two opposite view points. Coscarón (1984, 1987, 1990, 1991) and Crosskey (1987, 1990) have each had different perspectives in their definition of species limits in these two subgenera. Kuhn (1970) says we see the world using a particular metaphor and, always, different metaphors come from dissimilar theoretical frameworks. Since we have to choose just one classification to carry out our systematic research, we must try for this choice to be, if not completely objective, at least testable (*sensu* Popper, 1959, 1963).

## Generic concepts

The meaning of the word "genus" has been controversial since it was first proposed by Linnaeus (1735). The International Code of Zoological Nomenclature requires the use of this category as defined by Linnaeus. The "orthodox" school on the other hand, states that the species is the only valid or real taxonomic entity (see Mayr, 1969). The genus concept was originally used by Plato or maybe even before but its usefulness and value continue to be a matter of discussion (Radl, 1988; Papavero & Llorente, 1992; Papavero, Abe & Llorente, 1993a,b).

Plato (*circa* 370 b.c.) formulated the "diaeresis" method through which one could go bi-dissecting from general to particular to find the last indivisible particle. This "diaeretic" method is based on the "contradiction principle" which states that an object can not be included

simultaneously in being and not being. On this basis, first was the dicotomy {as a bi-section} guided by the affirmation - contradiction principle and second defining the object using the properties it has or lacks.

The effort to arrive at the classification of the last object (*eidōs=species*) through "diaeresis", made Plato and his academy understand the species as a logical systematic concept as opposed to the "genus" concept (*genos=genus*), which was placed eventually above it (Jahn *et al.*, 1990). At the beginning of the scholastic period Porfirio (*circa* 260) reinitiated the controversy by asking if the "genus" (and species) was a real entity [*sive substantia*] or only a conception of the mind [*sive in solis nudis intellectibus consistant*] (Radl, 1988).

Under Plato's view therefore, the species (*eidōs*) is the logical unit in the strict sense while the genus facilitates the grouping of the *eidōs* using a small set of characters (Papavero & Abe, 1992; Papavero & Llorente, 1992).

## Current definitions of "genus"

Papavero & Llorente (1992) proposed two generic definitions:

1) The C-genus {catalog genus} is the result of the Aristotelian postulates about species, based on individual "types". Since the species are abstractions, the genus becomes a meta-abstraction [an abstraction of an abstraction], therefore not being a real space-time entity. Using this definition, a genus is a "class" (*sensu* Hull, 1976).

2) The F-genus {phylogenetic genus} is the result of the application of evolutionary theory. It is a set of three or more species that is monophyletic *sensu* Hennig (1966). According to this definition, the genus is neither a "class" nor an "individual", but a historical group (*sensu* Wiley, 1981; Brooks & Wiley, 1988).

## Inclusion-exclusion test

Inclusion of a group in another, previously defined, group can be corroborated using the classical hypothetical-deductive scheme (Popper, 1959; 1963). The distribution of the sinapomorphies shows whether the group has at least one evolutionary novelty that covers all of its members, or if it is necessary to add additional taxa to obtain a monophyletic group. Such monophyly could also be tested by using the Topology Permutation Tail Probability Test [T-PTP] (Faith, 1991; Faith & Ballard, 1994).

If the F-genus definition is accepted and if not all nodes in the phylogeny are named, as **Papavero, Lorente & Abe** (1992) suggested, the genus becomes a monophyletic group. There is however no standard categorization of the node and, as a result, not all nodes correspond to a Linnean category (**Liden & Oxelman**, 1989; **Green**, 1991).

When a group is defined according to a homology series, the assignation of a name can be tested against the cladogram and the position of the "type".

Given the species

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

and two possible supraespecific units

I            II

where the type species are [eventually the "type" is only a name-bearing entity and does not define the group]:

I = 1        II = 2

it is possible to define two coherent supraespecific taxa if there is an arrangement such as the following:

I = { 1, 3, 4, 6 } II = { 2, 5, 7 }

or any other similar arrangement. If the monophyletic group is

I - II = { 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 }

this must be seen as only one supraespecific taxon which should be named according to the priority principle as established by the code.

Using the T-PTP test, the length of the different hypotheses is tested against the data and the shortest is selected. The two approaches must give the same result to define the genus as a monophyletic group (see *pro* PTP **Faith**, 1991, **Faith & Cranston**, 1992; but *against* **Bryant**, 1992).

### Supraspecific taxa and categories and their importance

Supraspecific taxa are important not only from the nomenclatural point of view. They are part of our language and of the way we manipulate reality. A good example of the importance of supraespecific taxa is provided by the sugarbeet leafhopper, *Circulifer tenellus*, which was originally thought to be a member of the genus *Eutettix*; under this assumption, the search for a natural enemy in South America was unsuccessful. When it was shown that it belonged in reality to the European genus *Circulifer*,

the search for enemies in the Mediterranean was successful and it was then possible to introduce them to California (SA2000, 1994).

By the same token, in ecological/environmental research there is continuous reference to supraespecific taxa. However, because many traditional taxa are paraphyletic, it is necessary to carry out phylogenetic studies to establish the monophyly of the groups concerned (**Cranston**, 1990; **Farris**, 1979, 1980, 1983). When supraespecific categories are defined on the basis of a phylogeny, the information they contain makes it possible to undertake different types of research such as character mapping and adaptation studies.

### The *Ectemnaspis* / *Psilopelmia* situation. A retrospective view and the state of the art.

Until 1914 all species of Simuliidae were assigned to *Simulium* (**Rubtsov**, 1974). **Malloch** (1914) adopted *Prosimulium* in a generic sense and proposed *Parasimulium* as a new genus. **Enderlein** (1921) recognized 17 genera and, later (**Enderlein**, 1930) increased that number to 30. **Edwards** (1931) considered only *Parasimulium* as a valid genus and assigned subgeneric rank to *Prosimulium*, *Morops*, *Gigantodax*, *Austrosimulium*, *Cnephia*, *Eusimulium* and *Simulium*.

**Enderlein** (1934) established the genera *Ectemnaspis* and *Psilopelmia* with *Simulium bicoloratum* and *S. escomeli*, respectively as types and included them in Nevermanniinae. Actually, subgenus *Nevermannia* is circumscribed to the holarctic and palaearctic regions and *Nevermannia* **Enderlein**, 1921 is a synonym of *Simuliini* **Newman**, 1834.

**Twinn** (1936) recognized only *Parasimulium* and *Simulium* as valid genera. He considered the other taxa as subgenera, implying that he saw no valid differences to accept these groups at the generic level.

**Fairchild & Briceño-Iragorry** (1943) placed their new species, *Simulium lutzianum*, in subgenus *Eusimulium* based on the presence of hairs on Rb, a conclusion that was agreed on by **Dampf** (1943).

**Vargas** (1945), in his first neotropical revision of Simuliidae placed *Eusimulium* in the synonymy of *Simulium*. **Vargas et al.** (1946) found the delimitation of genera and subgenera proposed by **Smart** (1945), **Enderlein** (1921 through 1937) and **Baranov** [cited by **Vargas**, 1945 and by **Crosskey & Peterson**, 1972], difficult to accept mainly because the characters they used



are of a secondary nature and cannot be used to show phylogenetic relationships.

Vargas *et al.* (1946) accepted, provisionally, Smart's (1945) genera *Austrosimulium*, *Cnephia*, *Gigantodax*, *Parasimulium*, *Prosimulium* and *Simulium*. They saw *Simulium* as a heterogeneous group that could be subdivided into subgenera. In *Simulium (Lanea)* [*S. (Psilopelmia)*] they included the following species: *S. beameri*, *S. callidum*, *S. dandrettai*, *S. downsi*, *S. dugesi*, *S. haematopotum*, *S. incrustatum*, *S. johannseni*, *S. mangabeirai*, *S. mediovittatum*, *S. ochoai*, *S. samboni*, *S. trivittatum*, *S. veracruzianum* and *S. zempoalense*.

*S. ochraceum* was placed by Vargas *et al.* (1946) and Iriarte (1947) in *Cnephia (Cnephia ochraceum)*, but Vargas and Díaz-Nájera (1951) moved it back into *Simulium*. Actually, *Cnephia* is a member of Prosimulini with a holarctic - palearctic distribution (Crosskey, 1987).

In the description of *S. romanai*, Wygodzinsky (1951) put that species in *Simulium* according to Vargas *et al.* (1946) key, based on male genitalia.

Dalmat (1955) proposed a new classification of *Simulium* using mainly the dorsal pattern in male/female adults, the shape of the gonostilum and the chaetotaxia in pupa stage, and the anal escleritis and secondary subdivision of the first antennal segment in larvae.

Díaz-Nájera & Vulcano (1961), in the description of *S. longithallum*, stated that *Psilopelmia* is composed of *S. mediovittatum*, *S. veracruzianum*, *S. ochoai*, *S. trivittatum*, *S. dugesi*, *S. haematopotum* and *S. longithallum*.

According to Díaz-Nájera (1961), the analysis of 13 yellow-colored species allowed him to recognize *S. (P.) antillarum* as a new species, and to conclude that *S. (P.) antillarum*, *S. (P.) dinellii*, *S. (Simulium) wolcottii* and *S. (S.) ochraceum* can be recognized as a homogeneous group, even though these four species had been previously placed in two different subgenera.

Stone (1963) considered *S. bicoloratum* as related to *S. flavifemur* which is the type of *Chirostilbia*, therefore placing *Ectemnaspis* in the synonymy of *Chirostilbia*.

Díaz-Nájera (1969) described six new species that he included in *Psilopelmia* because of their similarity in pupae form and adult color to *Simulium (Psilopelmia) trivittatum*.

Wygodzinsky (1971) revived *Chirostilbia rubiginosa*, a name that he applied to the southern Southamerica form

of *S. ignescens*, while keeping this name for the northern South American form. He redescribed *S. bicoloratum* and compared it with *S. (Chirostilbia) pertinax*. He did not agree however, with Stone's point of view (Stone, 1963), because there are differences between *S. bicoloratum* and *S. (C.) pertinax* in the uniform black color of the thorax of *S. (C.) pertinax*, the presence of plates in the scutellum, the shape of the ventral plate, the basimerus-distimerus length, and the cocoon shape. Wygodzinsky therefore, kept *Ectemnaspis* as a valid name because "these characters are on the level of those possibly indicating subgeneric difference."

According to Rubtsov & García-Avila (1972), the subdivision of genera and subgenera proposed by Enderlein (1930, 1933) and others was accepted by Dalmat (1955) without a critical analysis. As a result, whole groups of species were assigned to various genera and subgenera without explanation. According to these authors no revisions had been made until that time of the contents, size, taxonomic meaning or nomenclature of these names, or of the groups of species that actually exist in nature.

In addition to the species included by Dalmat (1955) in *Psilopelmia*, Rubtsov and García Avila also listed *S. callidum*, *S. jacobsi*, *S. samboni*, *S. haematopotum*, *S. dugessi*, *S. downsi*, *S. veracruzianum*, *S. colvini*, *S. dinellii*, *S. wolffhuegeli*, *S. jujuyense*, *S. opaliniformis*, *S. ignescens*, *S. romanai*, *S. adolfolti*, *S. paraguayense*, *S. bicoloratum*, *S. escomeli*, *S. riveti*, *S. limay*, *S. waltermittmeri*, *S. paynei*, *S. incrustatum* and *Chirostilbia*. If we follow this classification, then neither *Ectemnaspis* nor *Psilopelmia* are valid subgenera because the types of three different subgenera coexist in them. Using the priority principle, the correct name must be *Chirostilbia* (it comes first in Enderlein work). This subgenus definition, however, says nothing about phylogenetic relationships and does not permit the recognition of natural groups in a classification.

The phylogenetic approach was first proposed by Coscarón & Wygodzinsky (1972), who considered that *S. perflavum* should be induced in *Ectemnaspis*. They presented only an intuitive idea of *Ectemnaspis*, showing that the closest relationship is between *S. perflavum*, *S. dinellii*, *S. rubiginosum*, *S. ignescens*, *S. romanai* and *S. adolfolti*. This classification is quite similar to current opinion where *S. ignescens* and *S. rubiginosum* belong to the *bicoloratum* group while, *S. perflavum*, *S. romanai* and *S. dinellii* represent the other three groups in *Ectemnaspis*.

Coscarón (1984, 1987) recognized 37 species in subgenus *Ectemnaspis* which he distributed in 4 groups:

*bicoloratum*, *romanai*, *perflavum* and *dinellii* (Appendix 1). In his revision of neotropical *Simulium* (Coscarón, 1987) he also recognized subgenus *Psilopelmia* with 24 species with no additional subdivisions (Appendix 2). Subgenera *Psilopelmia* and *Ectemnaspis* are, along with the *S. oviedoii* group, monophyletic taxa with *Ectemnaspis* and *Psilopelmia* being sister groups.

According to Duque *et al.* (1988), Coscarón's (1987) classification is supported by chromosomal data, because extensive chromosomal homologies have been found to exist not only between *S. ignescens* and *Simulium* "C" [*S. tunja*], but also between *S. ignescens* and other *Ectemnaspis sensu* Coscarón (1984), including *S. ochraceum*.

Crosskey (1987), on the other hand, recognized only 14 species in *Ectemnaspis* (Appendix 1), almost as many as Coscarón (1984) had included in his *bicoloratum* group. Crosskey further recognized *Psilopelmia* as being composed of 50 species that include *Psilopelmia sensu stricto* plus Coscarón's *romanai*, *perflavum* and *dinellii* groups (Appendix 2). In Crosskey's view (personal communication) many of Coscarón's *Ectemnaspis* [*dinellii*, *perflavum* and *romanai* groups] are more related to *S. escomeli* (*Psilopelmia* type) than to *S. bicoloratum* (*Ectemnaspis* type). In some instances this is difficult to see because even though *S. romanai* and *S. lewisi* are closely related, Crosskey placed them in two different subgenera.

Shelley *et al.* (1989), in their study of onchocerciasis in Ecuador, included four species (*S. bipunctatum*, *S. lewisi*, *S. escomeli*, *S. quadrivittatum*) in *Psilopelmia sensu* Crosskey (1987), and questioned the validity of the two subgenera indicating that a decision on whether they should be maintained awaits further integrated morphological and cytological studies.

Using Coscarón's classification as their framework and using chromosomal banding patterns, Miranda & Muñoz de Hoyos (1993) defined the phylogenetic relationships within the *bicoloratum* group.

### The systematic context

This brief overview of the history of taxonomic studies on Simuliidae shows that the development of a classification of the family has been complicated by the different sets of characters being used as well as by the different perspectives with which authors have looked at them. Those perspectives depend on the sensorial perception and the conceptual scheme given a historical / social / personal moment. The representation of the hu-

man figure, for example is not the same in Dali's than in Leonardo's eye; the same analogy is valid for systematics [cf. Feyerabend (1987), his "Science as art"].

It is often not so easy to find a character that serves to define a group, not because this character does not exist, but because the researcher fails to recognize it as important or valid. As a result, some species move from one subgenus/genus to another following a particular researcher's views of supraspecific taxa. Genera and subgenera are defined according to that personal view, and species go in or out of them depending on whether some characters of the proposed member agree with those of a previous member of that group or not. This way, taxa are not under test; here we have C-genus impossible to corroborate.

When there are difficulties in defining limits between taxa the level of the character is of the utmost importance because different researchers assign different weights to the same character. These differences are not due to ignorance (in the colloquial sense) or lack of understanding. They are the result of the fact that each researcher is a product of his or her time and of the particular frameworks used to understand and manipulate nature. Different times produce different frameworks and dissimilar limits. Indeed, this is true not only of simuliids or even of insects. Recent hominid taxonomy shows a similar situation, and Wood's (1994) questions are valid not only to fossils: given a new specimen does the material belong to an existing species group? If not, can it be assigned to existing genera?, must the new species *aramis* be placed in *Australopithecus* or in *Pan*?, is it necessary to create a new genus?

White *et al.* (1994) suggested to include the new *Aramis* in *Australopithecus*. Wood (1994), on the other hand, stated: "My own prejudice is that, even on the present evidence, the differences between the *Aramis* species and *A. afarensis* are more profound, and are more likely to reflect the sorts of grade distinction that is most usefully reflected in generic distinctions, then the differences between, say, *A. afarensis* and *A. africanus*". With a quite different approach, Simon & Rasmussen (1994) described not only a new species, *Plesiopithecus teras*, but a new genus, family and superfamily as well.

Earlier Simuliid classifications were typological in nature (Dampf, 1943; Edwards, 1931; Enderlein, 1921, 1930, 1933; Fairchild & Briceño-Iragorry, 1943; Malloch, 1914; Twinn, 1936), as they tried to get to the essence (*eidos*) based on a small set of characters. At the beginning of this century evolution was seen from a different perspective than it is today.

By the middle of the century Darwin's ideas about evolution were commonplace so, while the context changed, such changes were relatively minor. Between 1943 and 1958 Vargas and collaborators (Vargas, 1943, 1945; Vargas & Díaz-Nájera, 1951, 1953, 1958; Vargas *et al.*, 1946) gave a connotation of importance to the male / female genitalia. Theirs was a typological view (to define the group on the basis of a few characters) but in a Darwinian sense (reproductive importance).

Wygodzinsky and Coscarón (Coscarón, 1984, 1987, 1990, 1991; Coscarón & Wygodzinsky, 1972; Wygodzinsky, 1951, 1953, 1958, 1971; Wygodzinsky & Coscarón, 1982), using a completely different approach, recognized synapomorphies as the only way to test or create a classification. Indeed Wygodzinsky was one of the earlier translators of Hennig's work (Farris & Platnick, 1989; Crow, 1992). But the transition to a truly phylogenetic approach is slow, as can be seen in some of their papers (Wygodzinsky, 1971; Coscarón & Wygodzinsky, 1972) where the darwinian context, based on the level or in the importance of characters is obvious.

Crosskey (1987, 1990) and Shelley *et al.* (1989), as apposed to Coscarón saw the species as the focal point of classification and did not concern themselves with the definitions or limits of genera and/or subgenera.

Crosskey's and Coscarón's views are not alternative theories (*sensu* Feyerabend, 1980) because each uses different statements based on different approaches. *Sensu lato*, these are incommensurable points. Crosskey does not deny phylogeny but his work is at the species level and does not include phylogenetic statements, while Coscarón is based mainly on phylogeny.

### The possible solution

Working with Prosimuliinae Py-Daniel (1990, 1994) has proposed to elevate subgenera to generic status and to redefine the current subfamily/tribe limits and groups. This problem is similar to the *Ectemnaspis* - *Psilopelmia* situation. It does not matter if a monophyletic group is recognized at the generic or subgeneric level. The real problem is that the solution must be coherent with data alongside sister groups in order to keep sister groups at the same hierarchical level. Whether the groups are recognized as genera or sugenera will depend on the context in relation to their sister supraspecific taxon. This situation could and must be modified in the future when new data (cytological, DNA) are available or when the way we see the characters change. If we include phylogeny in our perspective we can get a classification that could be

tested against data and not against a researcher's individual point of view. But we have to accept that today's classification is only a hypothesis that links an earlier classification with a later one.

### Acknowledgements

We thank to Dr. Sixto Coscarón (Museo de La Plata, La Plata, Argentina), who read a draft of the manuscript and helped with ideas, data and references. Colciencias and the Universidad Nacional de Colombia provided financial support for this project.

### Literature cited

- Brooks, D.R & E.O. Wiley. 1988. Evolution as entropy. University of Chicago press. Chicago.
- Bryant, H.N. 1992. The role of permutation tail probability test in phylogenetic systematics. *Systematic Zoology* 41:258-263.
- Coscarón, S. 1984. Revisión del Género *Simulium* (*Ectemnaspis*) Enderlein (Simuliidae: Diptera: Insecta). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina* 43:283-325.
- . 1987. El género *Simulium* Latreille en la Región neotropical: Análisis de los grupos supraespecíficos, especies que lo integran y distribución geográfica (Simuliidae: Diptera). Museo Paraense Emilio Goeldi. Belem
- . 1990. Taxonomía y distribución del subgénero *Simulium* (*Ectemnaspis*) Enderlein (Simuliidae, Diptera, Insecta). *IHERINGIA. Serie Zoologia. Porto Alegre* (70):109-170.
- . 1991. Insecta. Diptera. Simuliidae. Fascículo 2. Fauna de Agua dulce de la república de Argentina XXXVIII:1-304.
- & P. Wygodzinsky. 1972. Notas sobre simúlidos neotropicales III. Sobre tres especies de jejenos con hembras de color claro, del SE del Paraguay y del NE de la Argentina. *Revista del Museo de La Plata. Sección Zoología*. XI:209-231.
- Cranston, P.S. 1990. Biomonitoring and invertebrate taxonomy. *Environmental and Monitory Asses.* 14:265-273.
- Crow, R. 1992. Margins of cladistics: identity, difference and place in the emergence of phylogenetics systematics 1864-1975. pp. 65-107. In: Griffiths, P. (Ed.) *Essays on the Philosophy of Biology*. Kluger, Dordrecht, The Netherlands.
- Crosskey, R. 1987. An annotated checklist of the world black flies (Diptera:Simuliidae), pp. 425-520. In: Kim, K.C. & R.W. Merritt (Eds), *Black flies: ecology, population management and annotated word list*. The Pennsylvania State University Press. London.
- . 1990. *The natural history of Black flies*. Jhon Wiley & Sons. London.
- & B.V. Peterson. 1972. The simuliidae described by N. Baranov and their types (Diptera). *Bulletin British Museum. Entomology* 27:189-214.
- Cummins, K. 1987. The functional role of the black flies in stream ecosystems. pp. 1-10. In: Kim, K.C. & R.W. Merritt (Eds), *Black*

- flies: ecology, population management and annotated word list. The Pennsylvania State University Press. London.
- Dalmat, H.T.** 1955. The black flies (Diptera, Simuliidae) of Guatemala and their role as vectors of onchocerciasis. *Smithsonian Miscellaneous Collection* **125**:1-425.
- Dampf, A.** 1943. La crisálida de *Eusimulium ochraceum* (Walker 1860) (Insecta, Diptera). *Revista de la sociedad Mexicana de Historia Natural* **IV**:33-42.
- Díaz-Nájera, A.** 1961. Nota acerca de *Simulium (Psilopelmia) antillarum* Jennings, 1915, nueva especie para México. *Revista Instituto Salubridad y Enfermedades Tropicales (Méx.)* **21**:79-92.
- \_\_\_\_\_. 1969. Simúlidos de Aguascalientes y zacatecas. Descripción de seis especies del subgénero *Psilopelmia* y datos de dimorfismo. *Revista Instituto Salubridad y Enfermedades Tropicales (Méx.)* **29**:21-63.
- \_\_\_\_\_ & **M.A. Vulcano.** 1961. Descripción de *Simulium (Psilopelmia) longithalum* n.sp. (Diptera:Simuliidae). *Revista Instituto Salubridad y Enfermedades Tropicales (Méx.)* **21**:221-235.
- Duque, S., Muñoz de Hoyos, P. & K. Rothfels.** 1988. The polytene chromosomes of *Simulium (Ectemnaspis) ignescens* Roubaud and the related species *Simulium "C"*, both from Colombia. *Canadian Journal of Zoology* **66**:300-309.
- Edwards, F.W.** 1931. Simuliidae. In: *British Museum (Natural History): Diptera of Patagonia and South Chile* **2**:121-154.
- Enderlein, G.** 1921. Das System Kriebelmücken (Simuliidae). *Deutsch. Tierärztl. Wochenschr.* **29**:197-200.
- \_\_\_\_\_. 1922. Weitere Beiträge zur Kenntniss der Simuliiden *Konowia* **1**:67-76.
- \_\_\_\_\_. 1930. Der heutige Stand der Klassifikation der Simuliiden. *Arch. Klassif. Phylogen. Ent.* **1**:77-97.
- \_\_\_\_\_. 1934. Weiterer Ausban des Systems der Simuliiden. *Deutsch. Ent. Zeitschr (1933).* **I/II**:273-292.
- \_\_\_\_\_. 1935. Auëereuropaische Simuliiden aus dem Wiener Museum. *Sitzungsberichte der Gessellschaft naturforschender Freunde (1934)*:190-195.
- \_\_\_\_\_. 1937. Simuliologica I. *Sitzungsber. Gessell. Naturf. Fr.* pp. 113-130.
- Fairchild, G.B. & L. Briceño-Iragorrry.** 1943. Notas sobre *Simulium lutzianus*. *Boletín del Laboratorio Clínica Luis Razzeti* **3**:187-188.
- Faith, D. P.** 1991. Cladistic permutation test for Monophyly and non-monophyly. *Systematic Zoology* **40**:366-375.
- \_\_\_\_\_ & **J.W.O. Ballard.** 1991. Length differences and topology-dependent tests: a response to Källersjö *et al.* *Cladistics* **10**:57-64.
- \_\_\_\_\_ & **P.S. Cranston.** 1992. Probability, Parsimony and Popper. *Systematic Zoology* **41**:252-257.
- Farris, J.S.** 1979. On the naturalness of phylogenetic classification. *Systematic Zoology* **28**:200-214.
- \_\_\_\_\_. 1980. The information content of the phylogenetic system. *Systematic Zoology* **29**:483-519.
- \_\_\_\_\_. 1983. The logical basis of phylogenetic analysis. pp. 1-47 In: **Platnick, N.I. and V. A. Funk.** (Eds.) *Advances in Cladistics. Volume 2. Proceedings of the Second Meeting of the Willi Hennig Society.* Columbia University Press, New York.
- \_\_\_\_\_ & **N. Platnick.** 1989. Lord of the flies: the sistematist as study animal. *Cladistics* **5**:295-310.
- Feyerabend, P.K.** 1980. How to be a good empiricist - A plea for tolerance in matters epistemological. pp. 164-195. In: **Morick, H.** (Comp.) *Challenges to empiricism.* Methuen Co.
- \_\_\_\_\_. 1987. *Farewell to reason.* Verso. London.
- Green, D. M.** 1991. Chaos, Fráctals and Nonlinear Dynamics in Evolution and Phylogeny. *Trends in Ecology and Evolution* **6**:333-337.
- Hennig, W.** 1966. *Phylogenetic Systematics.* Univ. of Illinois press. Urbana.
- Hull, D.L.** 1976. Are species really individuals? *Systematic Zoology* **25**:174-191.
- Iriarte, D.R.** 1947. Nueva especie de simúlido para Venezuela. *Boletín del Laboratorio de la clínica Luis Razzeti.* **15**:509-511.
- Jahn, I., Lother R. & K. Senglaub.** 1990. *Historia de la Biología. Teorías, Métodos, Instituciones y Biografías breves.* Labor. Barcelona.
- Kuhn, T.S.** 1970. *The structure of scientific revolutions.* Univ. Chicago press. Chicago.
- Liden, M. & M. Oxelman.** 1989. Species Concept - Pattern or Process? *Taxon* **38**:228-232.
- Linnaeus, C.** 1735. *Systema Naturea, sive regna tria naturae systematice proposita per classes, ordines, genera & species.* Haak, Lugduni Batavorum (Leiden).
- Malloch, J.R.** 1914. American black flies or Buffalo gnats. U.S. department of agriculture. Bureau of Entomology. technical series (**26**):28-75.
- Mayr, E.** 1969. *Principles of systematic zoology.* McGraw Hill, New York.
- Miranda, D.R. & P. Muñoz de Hoyos.** 1993. Relaciones filogenéticas del género *Simulium* subgénero *Ectemnaspis* subgrupo *bicoloratum*. *Revista de la Academia de Ciencias.* **18**:571-577.
- Papavero, N. & J.M. Abe.** 1992. Funciones que preservan orden y categorías lineanas. *Publicaciones especiales del Museo de Zoología UNAM* **5**:39-74.
- \_\_\_\_\_ & **J. Llorente.** 1992. El uso equivoco del concepto género en sistemáticas filogenética. *Publicaciones especiales del Museo de Zoología* **5**:31-37.
- \_\_\_\_\_, **Abe, J.M. & J. Llorente.** 1993a. Propuesta de un nuevo sistema de nomenclatura para la sistemática filogenética. V: Las categorías supraespecíficas. *Publicaciones especiales del Museo de Zoología UNAM* **7**:1-45.
- \_\_\_\_\_, **Abe, J.M. & J. Llorente.** 1993b. Propuesta de un nuevo sistema de nomenclatura para la sistemática filogenética. VI: La cuestión de los 'subgéneros'. *Publicaciones especiales del Museo de Zoología UNAM* **7**:47-62.
- \_\_\_\_\_, **Llorente J. & J.M. Abe.** 1992. Propuesta de un nuevo sistema de nomenclatura para la sistemática filogenética I. *Publicaciones especiales del Museo de Zoología UNAM* **5**:1-20.
- Peterson, B.V.** 1993. The black flies of the genus *Simulium* subgenus *Psilopelmia* (Diptera:Simuliidae), in the contiguous United States. *Journal of the New York Entomological Society* **101**:301-390.
- Popper, K.** 1959. *The logic of the scientific discovery.* Hutchinson. London.
- \_\_\_\_\_. 1963. *Conjetures and refutations: the growth of Scientific Knowledge.* Harper & Row. New York.

- Py-Daniel, V.** 1990. Revisão da tribo Prosimuliini seg. Crosskey (Diptera, Culicomorpha, Simuliidae) nas regiões zoogeográficas neártica e neotropical (larvas e pupas). Ph. D. Thesis. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia.
- \_\_\_\_\_ & **R. T. Moreira Sampaio**, 1994. *Jalacingomyia* gen. n. (Culicomorpha); a ressurreição de Gymnopauidinae; a eliminação do nível tribal; a apresentação dos novos caracteres e a redescrção dos estgios larval e pupal de *Simulium colombaschense* (Fabricius, 1787) (Diptera:Simuliidae). Memorias del CAICET IV (1,2):101-148.
- Radl, E.M.** 1988. Historia de las teorías biológicas. vol I. Madrid. Alianza Universidad.
- Rubtsov, I. A.** 1974. Ob evolyutsii, filogenii i klassifikatsii semeistva moshek (Simuliidae, Diptera) [English translation. Evolution, phylogeny and classification of the family simuliidae (Diptera)]. Trudy. Zool. Inst. AN USSR 53:230-281.
- \_\_\_\_\_ & **I. García-Avila**. 1972. Los simúlidos de Cuba (Diptera:Simuliidae). Poeyana. Instituto de Zoología. Academia de Ciencias de Cuba 96:1-39.
- Shelley, A.J., Arzube M. & C.A. Couch.** 1989. The Simuliidae (Diptera) of the Santiago onchocerciasis focus of Ecuador. Bulletin of the British Museum natural History 58:79-130.
- Simon, E.L. & D.T. Rasmussen**, 1994. A remarkable cranium of *Plesiothecus teras* (Primates, Prosimii) from the eocene of Egypt. Proceedings. of the National Academy of Science USA. 91:9946-9950.
- Smart, J.** 1945. The classification of simuliidae (Diptera). Royal Entomological Society Transactions 95:463-528.
- Stone, A.** 1963. An annotated list of genus-group names in the family Simuliidae (Diptera). Agricultural research service USDA. Technical bulletin 1284:1-28.
- Systematics Agenda 2000**, 1994. Charting the biosphere. Technical report. New York.
- Twinn, C.R.** 1936. The blackflies of Eastern Canada (Simuliidae, Diptera). Part I. Canadian Journal of Research 14:97-150.
- Vargas, L.** 1943. Nombres y datos nuevos sobre simúlidos del Nuevo mundo. Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural 4:135-146.
- \_\_\_\_\_. 1945. Simúlidos del Nuevo Mundo. Monografías del Instituto de Salubridad y Enfermedades Tropicales (Méx.) 1:1-241.
- \_\_\_\_\_ & **A. Díaz-Nájera**. 1951. Nota sobre los simúlidos de México y su distribución geográfica (Diptera: Simuliidae). Revista Instituto de Salubridad y enfermedades tropicales (Méx.) 12:89-100.
- \_\_\_\_\_ & **A. Díaz-Nájera**. 1953. Nota sobre el examen de tipos de simúlidos descritos por el prof. G. Enderlein. (Méx.) Revista Instituto de Salubridad y enfermedades tropicales 13:137-152.
- \_\_\_\_\_ & **A. Díaz-Nájera**. 1958. Nota sobre *Simulium bivittatum* Malloch, 1914. Revista Instituto de Salubridad y enfermedades tropicales (Méx.) 18:13-30.
- \_\_\_\_\_, **Díaz-Nájera, A. & A. Martínez-Palacios**. 1946. Simúlidos de México. Datos sobre sistemática y morfología. Descripción de nuevos subgéneros y especies. Revista Instituto de Salubridad y enfermedades tropicales (Méx.) 7:101-192.
- White, T, Suwa, G. & B. Asfaw**. 1994. *Australopithecus ramidus*, a new species of early hominid from Aramis, Ethiopia. Nature. 371:306-312.
- Wiley, E.O.** 1981. Phylogenetics: the theory and practice of phylogenetic systematics. John Wiley and Sons, New York.
- Wood, B.** 1994. The oldest hominid yet. Nature. 371:280-281.
- Wygodzinsky, P.** 1951. Sobre *Simulium ignescens* Roubaud 1906, *Simulium romañai* sp. n. y *Simulium adolfolutzii* sp. n. (Simuliidae, Diptera). Anales del Instituto de Medicina Regional 32:221-236.
- \_\_\_\_\_. 1953. Sobre algunos Simúlidos de los países andinos. Anales del instituto de Medicina Tropical III:321-337.
- \_\_\_\_\_. 1958. Notas y descripciones de "Simuliidae" patagónicos y andinos (Diptera). Acta Zológica Lilloana 16:121-148.
- \_\_\_\_\_. 1971. Descriptions and redescrptions of species of the Black fly genus *Simulium* from the Northern Andes Simuliidae, Diptera). American Museum Novitates (2447):1-38.
- \_\_\_\_\_ & **S. Coscarón**. 1982. Description of three unusual species of the black fly subgenus *Simulium* (*Ectemnaspis*) from the Andes of Colombia (Diptera, Simuliidae). American Museum Novitates (2736):1-13.

Appendix 1. Species composition of subgenus *Ectemnaspis* Enderlein, 1934.**Sensu Coscarón (1990)*****Bicoloratum* group**

- S. antonii* Wygodzinsky, 1953  
*S. arcabucense* Coscarón, 1990  
*S. bicoloratum* Malloch, 1912  
*S. bicornutum* Wygodzinsky & Coscarón, 1982  
*S. cormonsi* Wygodzinsky, 1971  
*S. furcillatum* Wygodzinsky & Coscarón, 1982  
*S. ignescens* Roubaud, 1906  
*S. jaimeramirezi* Wygodzinsky, 1971  
*S. pautense* Coscarón & Takaoka 1989  
*S. pifanoi* Ramírez-Pérez, 1971  
*S. roquemayu* Coscarón, 1984  
*S. rubiginosum* (Enderlein, 1934)  
*S. tolimaense* Coscarón, 1984  
*S. tunja* Coscarón, 1990

***Romanai* group**

- S. albanense* Coscarón, 1990  
*S. alirioi* Ramírez-Pérez & Vulcano, 1973  
*S. gabaldoni* Ramírez-Pérez, 1971  
*S. lewisi* Ramírez-Pérez, 1971  
*S. lutzianum* Pinto, 1931  
*S. mayuchuspi* Coscarón, 1990  
*S. romanai* Wygodzinsky, 1951  
*S. wolffhuegeli* (Enderlein, 1922)

***Perflavum* group**

- S. kabanayense* Ramírez-Pérez & Vulcano, 1973  
*S. maroniense* Floch & Abonnenc, 1946  
*S. perflavum* Roubaud, 1906  
*S. rorotaense* Floch & Abonnenc, 1946  
*S. suarezi* Ramírez-Pérez, Rassi & Ramírez, 1977

***Dinellii* group**

- S. antillarum* Jennings, 1915  
*S. bipunctatum* Malloch, 1912  
*S. dinellii* Joan, 1912  
*S. nuneztovari* Ramírez-Pérez, Rassi & Ramírez, 1977  
*S. ochraceum* Walker, 1861  
*S. pseudoantillarum* Ramírez-Pérez & Vulcano, 1973  
*S. scutellatum* Lane & Porto, 1940  
*S. shewellianum* Coscarón, 1984  
*S. wolcotti* Fox, 1953  
*S. wuayaraka* Ortiz, 1957

**Sensu Crosskey (1987)**

- S. adolfolutzii* Wygodzinsky, 1951  
*S. antonii* Wygodzinsky, 1953  
*S. bicoloratum* Malloch, 1912  
*S. bicornutum* Wygodzinsky & Coscarón, 1982  
*S. cormonsi* Wygodzinsky, 1971  
*S. furcillatum* Wygodzinsky & Coscarón, 1982  
*S. ignescens* Roubaud, 1906  
*S. jaimeramirezi* Wygodzinsky, 1971  
*S. pifanoi* Ramírez-Pérez, 1971  
*S. romanai* Wygodzinsky, 1951  
*S. roquemayu* Coscarón, 1985  
*S. rubiginosum* (Enderlein, 1934)  
*S. sicuani* Smart, 1944  
*S. tolimaense* Coscarón, 1985

New species described after 1990 (Placed in the **romanai** group).

- S. anaimense* Coscarón & Muñoz de Hoyos, 1995

**Apéndice 2.** Species composition of subgenus *Psilopelmia* Enderlein, 1934.

**Sensu Coscarón (1987)**

- S. bivittatum* Malloch, 1914  
*S. callidum* (Dyar & Shannon, 1927)  
*S. dandrettai* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. downsi* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. dugesi* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. escomeli* Roubaud, 1909  
*S. gonzalezherrejoni* Díaz Nájera, 1969  
*S. haematopotum* Malloch, 1914  
*S. iracouboense* Floch & Abonnenc, 1946  
*S. jacobsi* Dalmat, 1953  
*S. jerezense* Díaz Nájera, 1969  
*S. letrasense* Díaz Nájera, 1969  
*S. longithallum* Díaz Nájera & Vulcano, 1962  
*S. mangabeirai* Vargas, 1945  
*S. mediovittatum* Knab, 1969  
*S. netтели* Díaz Nájera, 1969  
*S. ochoai* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. olimpicum* Díaz Nájera, 1969  
*S. pseudocallidum* Díaz Nájera, 1965  
*S. samboni* Jennings, 1915  
*S. trivittatum* Malloch, 1914  
*S. veracruzianum* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. vulcanoe* Díaz Nájera, 1969  
*S. zenpoalense* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946

**Sensu Crosskey (1987)**

- S. alirioi* Ramírez-Pérez & Vulcano, 1973  
*S. antunesi* Lane & Porto, 1940  
*S. bipunctatum* Malloch, 1912  
*S. bivittatum* Malloch, 1914  
*S. callidum* (Dyar & Shannon, 1927)  
*S. dandrettai* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. dinellii* (Joan, 1912)  
*S. downsi* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. dugesi* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. escomeli* Roubaud, 1909  
*S. gabaldoni* Ramírez-Pérez, 1971  
*S. gonzalezherrejoni* Díaz Nájera, 1969  
*S. griseum* Coquillett, 1898

- S. haematopotum* Malloch, 1914  
*S. iracouboense* Floch & Abonnenc, 1946  
*S. jacobsi* Dalmat, 1953  
*S. jerezense* Díaz Nájera, 1969  
*S. kabanayense* Ramírez-Pérez & Vulcano, 1973  
*S. letrasense* Díaz Nájera, 1969  
*S. lewisi* Ramírez-Pérez, 1971  
*S. longithallum* Díaz Nájera & Vulcano, 1962  
*S. lutzianum* Pinto, 1932  
*S. mangabeirai* Vargas, 1945  
*S. mauense* Nunes de Mello, 1974  
*S. mazzottii* Díaz Nájera, 1981  
*S. mediovittatum* Knab, 1969  
*S. netтели* Díaz Nájera, 1969  
*S. nilési* Rambajan, 1979  
*S. notatum* Adams, 1904  
*S. nuneztovari* Ramírez-Pérez, Rassi & Ramírez, 1977  
*S. ochoai* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. ochraceum* Walker, 1861  
*S. olimpicum* Díaz Nájera, 1969  
*S. panamense* Fairchild, 1940  
*S. perflavum* Roubaud, 1906  
*S. pseudoantillarum* Ramírez-Pérez & Vulcano, 1973  
*S. pseudocallidum* Díaz Nájera, 1965  
*S. quadrivittatum* Loew, 1862  
*S. rorotaense* Floch & Abonnenc, 1946  
*S. samboni* Jennings, 1915  
*S. shewellianum* Coscarón, 1985  
*S. spinifer* Knab, 1914  
*S. suarezi* Ramírez-Pérez, Rassi & Ramírez, 1977  
*S. sucamense* Nunes de Mello, 1974  
*S. trivittatum* Malloch, 1914  
*S. venator* Dyar & Shannon, 1927  
*S. veracruzianum* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
*S. vulcanoe* Díaz Nájera, 1969  
*S. wolffhuegeli* Enderlein, 1922  
*S. zenpoalense* Vargas, Martínez Palacios & Díaz Nájera, 1946  
 New species described after 1990  
*S. labellei* Peterson, 1993  
*S. robynae* Peterson, 1993

# *Simulium (Grenieriella) sumapazense* Coscarón & Py-Daniel (DIPTERA:SIMULIIDAE). DESCRIPCION DEL ADULTO Y LARVA. REDESCRIPCION DE LA PUPA<sup>1</sup>

por

Paulina Muñoz de Hoyos<sup>2</sup>

## Resumen

Muñoz de Hoyos, P. :*Simulium (Grenieriella) sumapazense* Coscarón & Py-Daniel (Diptera:Simuliidae). Descripción del adulto y larva. Redescrpción de la pupa. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **20** (76): 141-148, 1996. ISSN 0370 - 3908.

Se describen el macho farate, la hembra farate y la larva de *Simulium (Grenieriella) sumapazense*, estados desconocidos de la especie, con material proveniente del río Teusacá, a una altitud de 3270 m, en la vía Bogotá - Choachí, Cundinamarca, Colombia. Se discute su posición subgenérica.

**Palabras claves** : Simuliidae - Taxonomía - Colombia.

## Abstract

The female, male and larva of *Simulium (Grenieriella) sumapazense* are described. The species is found in the Teusacá river, at 3270 m, in the road between Bogotá and Choachí, Cundinamarca, Colombia. The subgeneric position of the species is discussed.

**Key words**: Simuliidae - Taxonomy - Colombia.

## Introducción

La especie *Simulium sumapazense* fue descrita con 2 pupas vacías y restos de un macho farate por Coscarón y Py-Daniel en 1989. El holótipo, correspondiente a una

exuvia de pupa colectada en el Páramo de Sumapaz, a 3700 m. alt. por P. y B. Wygodzinsky el 30 de junio de 1965, y el parátipo, otra pupa vacía colectada en el Páramo de Guasca a 3000 m. alt. por P. y B. Wygodzinsky el 20 de junio de 1967, reposan en el American Museum Natural History (AMNH).

En los dos años de trabajo con los simúlidos de la región de Chisacá (Páramo de Sumapaz), llevado a cabo por el grupo de simúlidos del Instituto de Ciencias Natu-

<sup>1</sup> Proyecto financiado por Colciencias y Universidad Nacional.

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 7495, Santafé de Bogotá, D. C. Colombia.



rales, *S. sumapazense* no se encontró y se llegó a pensar que podría ser una variación de *S. muisorum* Bueno, Moncada & Muñoz de Hoyos, 1979 especie semejante y muy frecuente en el páramo de Sumapaz (Muñoz de Hoyos *et al.*, 1994).

En las colecciones de simúlidos efectuadas en 1993 en varias regiones de Cundinamarca se tuvo la suerte de encontrar suficientes larvas y pupas de *S. sumapazense* en el río Teusacá en la vía Bogotá-Choachí a 3270 m. alt. en el departamento de Cundinamarca en zona de bosque alto andino/páramo y con este material se pudo complementar la descripción original y a su vez resolver la duda de su existencia y ubicación subgenérica.

Los métodos de colección y montaje de especímenes son los utilizados en el Museo de Historia Natural de Londres.

### *Simulium (Grenieriella) sumapazense*

Coscarón & Py-Daniel, 1989. Rev. Saúde públ., S. Paulo, 23 (4) : 313-321.

(Figs. 1-4)

**Hembra farate.** (Fig. 1). Longitud ala 3.15 mm. Anchura cabeza 0.95 mm. Anchura frente 0.2 mm. Longitud antena 0.64 mm.

Antena de color castaño oscuro con excepción del escapo que es más claro. *Scutum* y *postnotum* de color castaño oscuro. *Scutellum* color castaño claro con abundantes pelos. Patas bicolores. Abdomen color oscuro.

Cibario con porción basal esclerotizada, salvo en la región media donde exhibe cerca de 26 dentículos pequeños, a manera de tubérculos y con cornuae grande y pigmentada (Fig. 1a). Último artejo antenal alargado (Fig. 1b). Triángulo frontocular profundo, más alto que ancho. Relación artejos III - V del palpo maxilar : 1 : 1 : 2 (Fig. 1b). Relación largo/ancho del artejo III del palpo 3. Vesícula sensorial ovalada; relación largo/ancho 1.6 (Fig. 1b). Mandíbula con 32 denticillos en el margen interno. Lacinia con 14-16 dientes.

Ala con mechón de pelos oscuros y largos en la porción basal de C y en la vena principal. Vena Sc con cerca de 22-24 pelos en hilera. Sección basal de R con pelos dispuestos en hilera. R1 con pelos y espinas en hilera. Rs con 1 hilera de pelos. Proporción y color de los segmentos de las patas según las figuras 1c-1e. Relación largo/ancho basitarso posterior 5.42. Calcícala subcuadrada, cubre el pedisulco. Uña curvada con diente basal bien desarrollado (Fig. 1f).

Octavo esternito con área mediana esclerotizada y cerca de 30 pelos a cada lado, más concentrados en la porción media. Gonapófisis subtriangulares, cubiertas de microvellosidades y redondeadas apicalmente (Fig. 1g). Cerco hemiesférico y paraprocto membranoso en su porción distal con ápice redondeado (Fig. 1h). Horquilla con procesos anteriores bien desarrollados y esclerotizados; mango esclerotizado y largo (Fig. 1i). Espermateca ovalada, esclerotizada, con espículas pequeñas en su superficie; área de inserción del ducto espermático membranosa; relación largo/ancho 1.27 (Fig. 1j).

**Macho farate.** (Fig. 2). Longitud ala: 3.12 mm. Clípeo con pelos negros largos. *Scutum* de color marrón oscuro cubierto de pelos negros. *Scutellum* un poco más claro que el anterior e igualmente con pelos. *Postnotum* de color igual al *scutum*; con pelos largos y oscuros. Abdomen oscuro, tergito I con flequillo de pelos largos; tergitos IV-VII con placas tergaes.

Palpo maxilar, especialmente los artejos II y III, con pelos oscuros y largos; relación artejos III-V del palpo maxilar : 1 : 0.9 : 2.2; III artejo 3 veces más largo que ancho. Vesícula sensorial 1/3 del artejo que la contiene. Antena con escapo y pedicelo cubierto de pelos largos y oscuros. Con el 1° flagelómero largo, el doble del 2°. Último casi tan largo como el 1° y más claro.

C con pelos y espinas entremezclados en 2 ó 3 hileras. Sc con 4-5 pelos basales. Rb con cerca de 27 pelos dispuestos en hilera. R1, Rs y penacho basal de C como en la hembra. Coloración y proporción de las patas como en la hembra. Calcícala tan larga como ancha, alcanza solo a tapar el pedisulco. Fémur pata posterior con pelos color claro entremezclados con pelos oscuros. Relación largo/ancho del basitarso posterior = 3 (contra 3.5 de la descripción original).

Distímero el doble de largo del basímero, acuminado en el ápice y con fuerte espina subterminal. Relación largo/ancho del distímero 2.5. Basímero 2 veces más ancho que largo (Fig. 2a). Placa ventral 1.5 veces más ancha que alta, con una leve saliente media y con los procesos laterales fuertemente esclerotizados y rectos; relación largo ancho del cuerpo de la placa ventral 2.1; con pocos pelos oscuros y largos, más concentrados en la saliente media donde presentan cierta curvatura (Fig. 2b). Esclerito mediano 2 veces más largo que ancho, con incisión media profunda (Fig. 2c). Órgano endoparameral sin dientes (Fig. 2d).

**Pupa.** (Fig. 3). Capullo en forma de zapato, compacto, resistente, con borde anterior reforzado; de color café

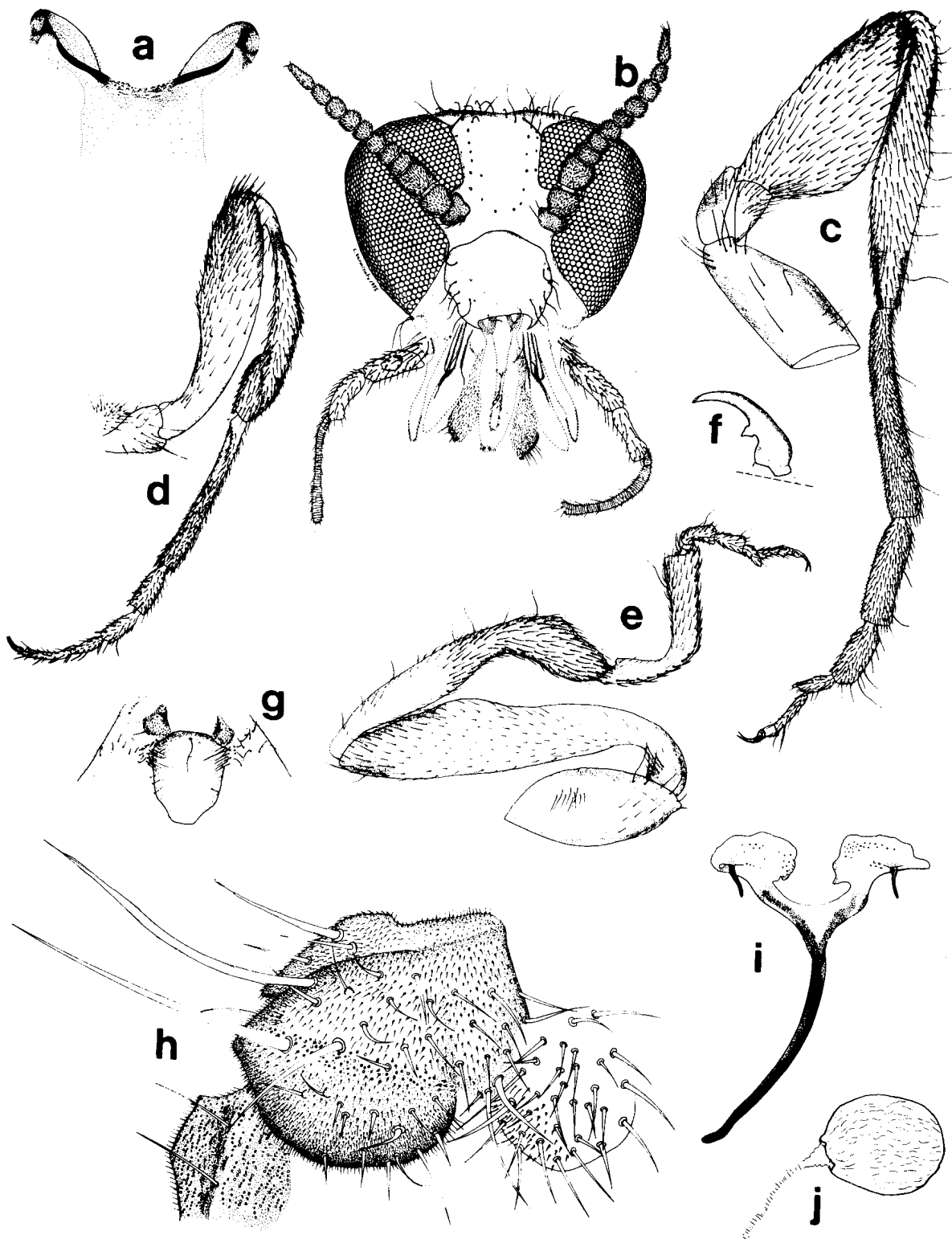


Figura 1. *Simulium sumapazense*. Hembra farate. 1a. Cibario. 1b. Cabeza. 1c. Pata anterior. 1d. Pata media. 1e. Pata posterior. 1f. Uña pata posterior. 1g. Gonapófisis. 1h. Cerco y paraprocto. 1i. Horquilla. 1j. Espermoteca.

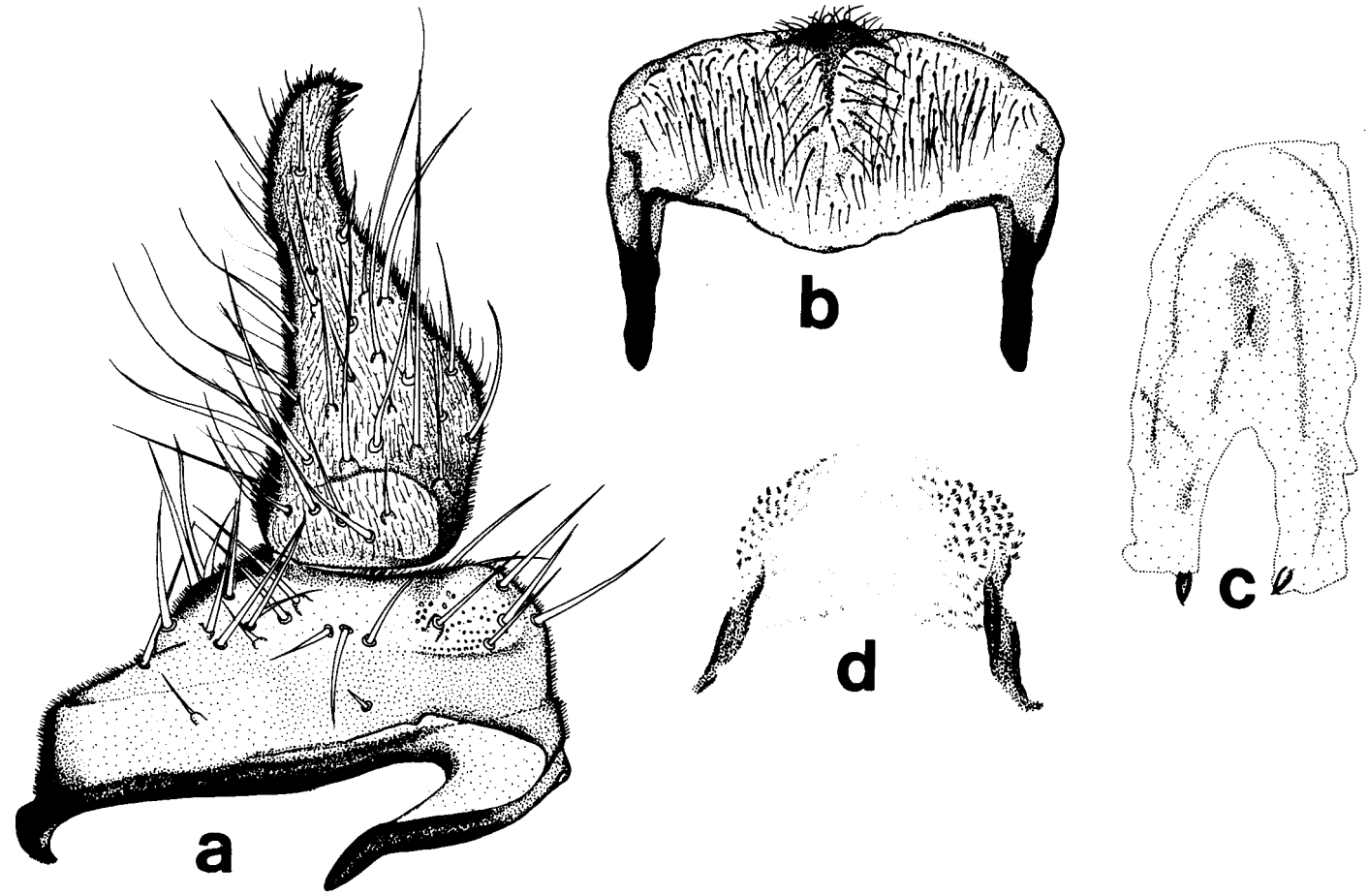


Figura 2. *Simulium sumapazense*. Macho farate. 2a. Basímero y distímero. 2b. Placa ventral. 2c. Esclerito mediano. 2d. Organo endoparameral.

oscuro cobrizo, trama visible (Fig. 3a). Longitud en la base 3.8 - 4.0 mm; en el dorso 3.0 - 3.3 mm; longitud de la proyección anteroventral 1.2 - 1.5 mm (n=3); longitud máxima de los filamentos respiratorios 0.75 mm en el macho y 0.79 mm en la hembra (contra 0.9 - 1.2 mm señalado en la descripción original).

Frontoclípeo reforzado ventralmente, por encima de los tricomas faciales; con 1+1 tricomas faciales y 2+ 2 tricomas frontales de 4-7 ramas cada uno; con tubérculos localizados sólo bajo la zona reforzada; con 5 grupos de placas: 2 anterolaterales, 2 posterolaterales y 1 mediana (Fig.3b, 3c). Tórax sin tubérculos, salvo en la región cercana a la implantación de la branquia respiratoria donde son redondos y en la porción distal donde son acuminados; con 5+5 tricomas torácicos de 8-9 ramas cada uno y con 4 distales de 5-8 ramas cada uno (Fig. 3d, 3e). Quetotaxia abdominal como en la figura 3f.

Branquias compuestas de 12 filamentos cortos, de color oscuro y superficie rugosa y puntiforme; con bordes irregulares y aguzados apicalmente; con 3 ramas primarias, presentando la posterior 6 filamentos dispuestos en un plano, la media 2 filamentos relativamente largos y la anterior 4 filamentos cortos (Fig.3d).

**Larva:** (Fig. 4). Longitud máxima larva madura 7.6 - 8.7 mm (n=7). Cabeza castaño claro a castaño oscuro. Forma del cuerpo según la figura 4a.

Apotoma cefálico con mancha posteromediana oscura y con una serie de placas, 4-5 en la porción anteromediana, todas ovaladas pero la más distal pequeña y menos elongada y con aproximadamente 9 hileras de placas en la porción posteromediana aparentemente fusionadas (Fig. 4b). Tegumento del apotoma y de la cabeza en general cubierto con tricomas simples. Puente postgenal amplio, casi la mitad de la altura del hipostomio. Escota-

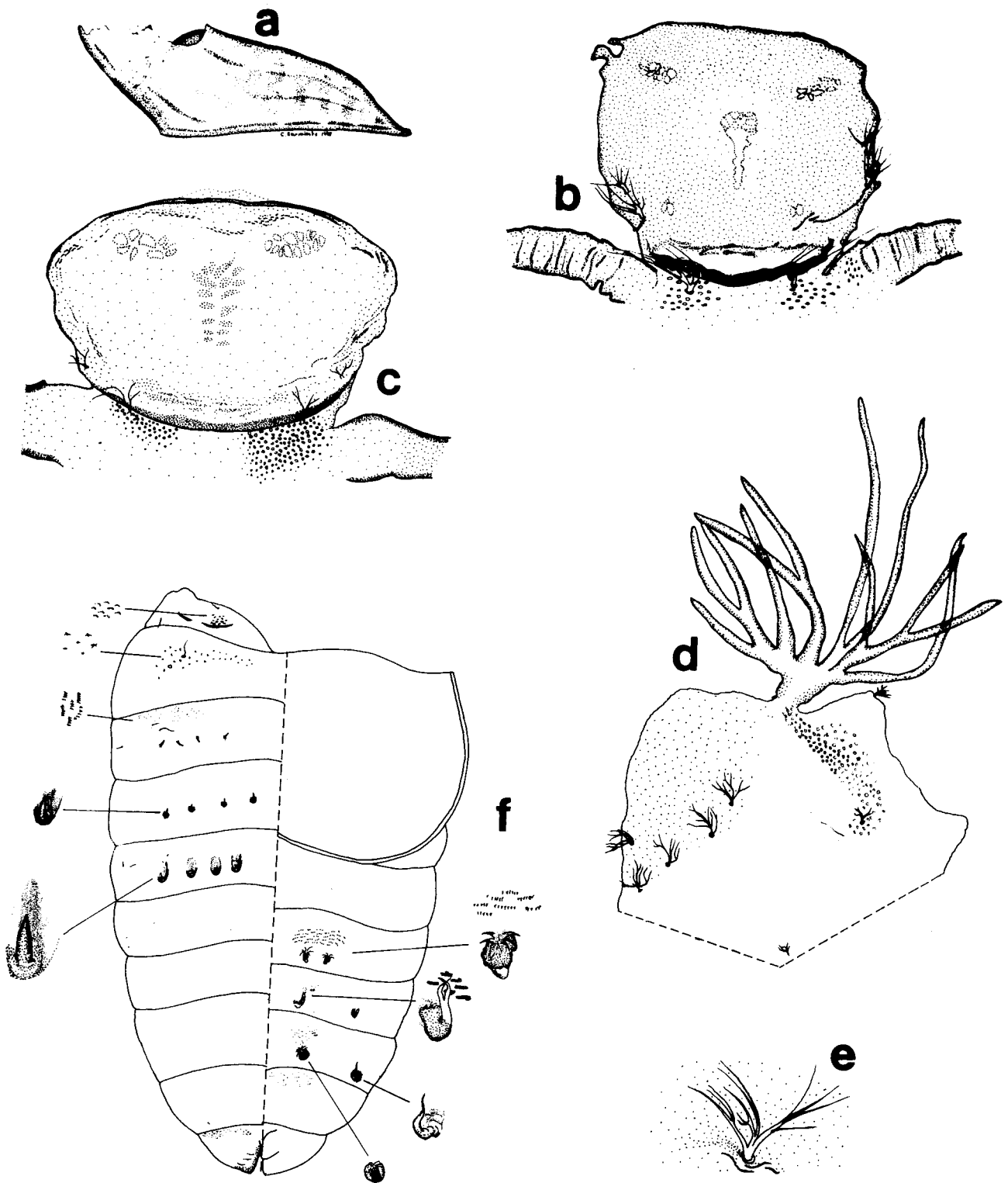


Figura 3. *Simulium sumapazense*. Pupa. 3a. Vista general. 3b. Frontoclípeo masculino. 3c. Frontoclípeo femenino. 3d. Cefalotórax y branquias respiratorias. 3e. Detalle tricoma cefalotórax. 3f. Quetotaxia.

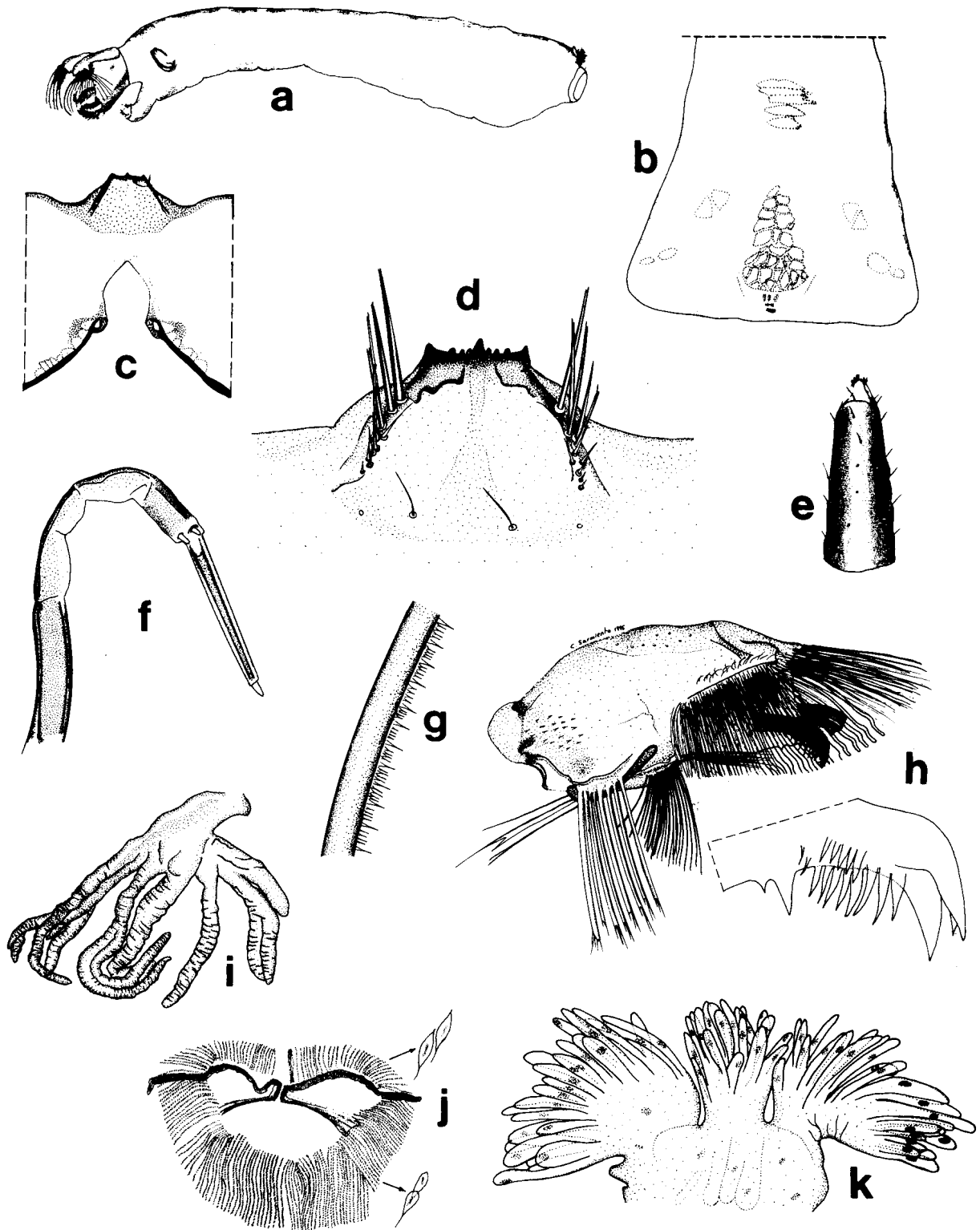


Figura 4. *Simulium sumapazense*. Larva. 4a. Vista general. 4b. Apotoma cefálico. 4c. Escotadura gular. 4d. Hipostomio. 4e. Palpo maxilar. 4f. Antena. 4g. Detalle del rayo del abanico cefálico. 4h. Mandíbula. 4i. Histoblasto. 4j. Esclerito anal. 4k. Branquias anales.

dura gular subtriangular, con bordes fuertemente esclerotizados en la región del hueco tentorial (Fig. 4c). Manchas ovaladas y largas principalmente en la región genal por encima del occiput. Hipostomio con 1 hilera irregular de 9-13 setas hipostomiales. Diente medio del hipostomio sobrepasando ligeramente la altura de los dientes esquineros. Cuerpo del hipostomio con 2+2 espinitas. Borde del hipostomio sin aserraciones definidas (Fig. 4d). Relación largo/ancho palpo maxilar 1.8 - 2.2, tomando en cuenta solo la región pigmentada (Fig. 4e). Antena pigmentada con el 1° artejo grueso. Relación artejos antenales I-III: 1 : 1.56 - 1.90: 0.75 - 1.10 (Fig. 4f). Antena ligeramente más larga que la base del abanico cefálico. Abanico cefálico con 40-44 rayos mayores, con fuertes dentículos alternados con unos más pequeños (Fig. 4g). Mandíbulas con 1 diente apical fuerte y largo, 3 dientes gruesos preapicales, siendo el segundo más largo que el 1° y el 3°, con dos hileras de 7 y 5 dientes internos respectivamente, cortos y gruesos; serrulaciones marginales compuestas por un diente anterior bien desarrollado y otro secundario menor que la mitad del primero; con peine anterior corto y sobresaliente; relación largo/ancho de la mandíbula 1.56 - 1.59 (Fig. 4h). Histoblasto como en la figura 4i.

Esclerito anal con pelos y 6 hileras de escamas sencillas entre los brazos dorsales. El brazo ventral relativamente largo y fuerte (Fig. 4j). Anillo anal con más de 150 hileras de ganchos, con cerca de 24-26 ganchos por hilera (Fig. 4j). Branquias anales con 3 lóbulos que llevan 26-20-26 divertículos cada uno, siendo los del central más cortos (Fig. 4k).

**Bionomía.** Es una especie de bosque alto andino/páramo, con preferencia a las aguas frías y cristalinas y con buena corriente. Habita en compañía de *Gigantodax basinflatus* y *G. misitu*. Las larvas y las pupas se adhieren a sustratos rocosos. Por su abundancia se puede inferir que la región muestreada es un sitio de cría apto para la especie con temperatura del agua de 7°C, pH 6.3 y resistencia de 0.046 mV.

**Material examinado.** Colombia. Cundinamarca: Río Teusacá, vía Bogotá - Choachí, 3270 m, oct-23-93, P. Muñoz, montados en lámina: hembra farate, ICN-MHN-DIPSi 1050; machos farate, ICN-MHN-DIPSi 1038, 1051; pupas, ICN-MHN-DIPSi 1037, 1049; larvas, ICN-MHN-DIPSi 1035, 1036, 1053; conservadas en alcohol: pupas, ICN-MHN-DIPSi 1041 y larvas, ICN-MHN-DIPSi 1040.

**Distribución.** Colombia: Cundinamarca.

## Discusión

Con el fin de ubicar subgenéricamente a *S. sumapazense* se tomó en cuenta el análisis de los grupos supraespecíficos de Coscarón quien, en 1987, consideró al subgénero *Hemicnetha* conformado por dos subgéneros: *Hemicnetha* y *Grenieriella*. El primero dividido en los subgrupos *mexicanum*, *paynei* y *brachycladum* y el segundo en los subgrupos *lahillei*, *nigrimanum* y *muiscorum*. Con material de la colección del Instituto de Ciencias Naturales-Museo Historia Natural de las especies *S. mexicanum*, *S. paynei*, *S. pulverulentum*, representantes de los tres subgrupos del subgénero *Hemicnetha* y *S. muiscorum*, representante del grupo *muiscorum* del subgénero *Grenieriella*, se hizo la comparación de algunas características de larva, pupa, hembra y macho para encontrar el grupo monofilético al cual pertenece *S. sumapazense* y se llegó a la conclusión de que las características son propias del subgénero *Grenieriella*. Los rasgos que tienen más peso para separar estos subgéneros son: presencia o ausencia de dientes en el cibario y longitud del ala de la hembra; relación largo/ancho del basitarso posterior y presencia o ausencia de dientes en el órgano endoparameral del macho; tricomas en el frontoclípeo y presencia o ausencia de tubérculos en tórax y cabeza de la pupa y tamaño y distribución de los dientes en la mandíbula de la larva.

Las hembras de *S. sumapazense* y *S. muiscorum* exhiben frente relativamente ancha, triángulo frontocular profundo, sector basal de R con pelos, uña con fuerte proceso subbasal; porción mediana del 8° esternito esclerotizada, paraproctos más anchos que largos y horquilla con brazos ensanchados distalmente. La gonapófisis de *S. sumapazense* es más pequeña que la de *S. muiscorum*. Los machos concuerdan en las siguientes características: órgano endoparameral con base robusta y carente de ganchos; esclerito mediano con incisión media profunda, basímero más ancho que largo, distímero, subtriangular, más largo que el basímero con suave convexidad interna, placa ventral ancha y corta. Las pupas poseen capullo resistente con borde anterior elevado protegiendo la base de las branquias, branquias relativamente gruesas, aguzadas apicalmente y tricomas multiramados. El peine de espinas en el antepenúltimo segmento abdominal de la pupa señalado por Coscarón (1987) para el subgénero *Grenieriella* no aparece ni en *S. sumapazense* ni en *S. muiscorum*, por lo tanto se sugiere revisar este rasgo. Las larvas tienen diente medio del hipostomio normal, numerosas setas hipostomiales en hileras irregulares, anillo anal con escamas, mandíbula con diente apical fuerte y el segundo preapical más largo que el primero.

## Conclusiones

La división del subgénero *Hemicnetha* en *Hemicnetha* propiamente dicho, y *Grenieriella* era necesaria. Por los caracteres de los adultos y las formas inmaduras, la especie *S. sumapazense* se ubica en el subgénero *Grenieriella*, grupo *muiscorum*, con lo cual este grupo queda representado por dos especies, ambas de Colombia: *S. muiscorum* Bueno, Moncada y Muñoz de Hoyos, 1979 y *S. sumapazense* Coscarón y Py-Daniel, 1989.

## Agradecimientos

Este trabajo hace parte del programa de investigación "Biología de los simúlidos de Colombia" financiado por Colciencias y Universidad Nacional de Colombia. La autora desea expresar sus agradecimientos al Doctor Sixto Coscarón por la revisión del manuscrito, a los biólogos Daniel Rafael Miranda, Claudia Moreno y estudiantes de Biología Sandra Chiguasuque y Ramón Mena por la ayuda en el campo, al señor Carlos Sarmiento por la elabo-

ración de los dibujos y al señor Fredy Castellanos por la preparación de los montajes.

## Bibliografía

- Bueno, M., Moncada, L. & P. Muñoz de Hoyos. 1979. Simuliidae (Insecta:Diptera) de Colombia. I. Nueva especie de *Simulium* (*Hemicnetha*). *Caldasia* 12 (60): 581 - 594.
- Coscarón, S. 1987. El género *Simulium* Latreille en la región neotropical: análisis de los grupos supraespecíficos, especies que lo integran y distribución geográfica (Simuliidae, Diptera). MCT-CNPq. Museu Paraense Emilio Goeldi. Colecao Emílio Snethlage. Belém. 112p.
- \_\_\_\_\_ & V. Py-Daniel. 1989. Tres especies nuevas de *Simulium* Latreille de la región neotropical: *Simulium* (*Hemicnetha*) *crystalinum* sp. n., (*Grenieriella*) *wygodzinskyorum* sp. n. y *sumapazense* sp. n. (Diptera : Simuliidae).. *Rev. Saúde públ.* 23 (4) : 313 - 321.
- Muñoz de Hoyos, P., Martínez, X., Mejía, A. & M. L. Bueno. 1994. Simúlidos (Diptera:Simuliidae) de la región de Chisacá, Cundinamarca, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 19 (73) : 393-412.

# VIDA ACADEMICA

## PALABRAS PRONUNCIADAS POR EL PRESIDENTE DE LA ACADEMIA EN EL FORO DE DOCTORADOS - ICFES - OCTUBRE 26-27 DE 1995

El establecimiento de Programas de Doctorado de las Facultades de Ciencias, en las Universidades que califiquen para asumir tan alta y exigente responsabilidad marca, sin duda, un hito transcendental en el desarrollo de la Ciencia en nuestro medio y en el avance de nuestras instituciones Universitarias hacia la superación del modelo que durante siglos prevaleció en nuestro ámbito cultural y cuyas metas parecían agotarse en la simple transmisión de los saberes ya consolidados o, cuando mucho, en el entrenamiento técnico de los futuros profesionales; mientras que a la innovación o creación de nuevos conocimientos, de nuevas teorías, de nuevos enfoques filosóficos, de nuevos procedimientos y dispositivos tecnológicos se consideró menesteres marginales, cuando no extraños a sus fines.

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales que en todo tiempo, desde cuando surgió la vida institucional ha propendido y defendido con ahínco todo esfuerzo dirigido a superar tal condición marginal de la Ciencia, ha seguido con mucho interés los esfuerzos y situaciones que han venido dándose, en nuestro país, en particular al interior de las Universidades mayores, dirigidos a incorporar la investigación científica a la Universidad Colombiana como una de sus tareas fundamentales; esfuerzos que finalmente culminaron con la apertura de los primeros programas de doctorado; desde luego, tras la concientización cada vez más profunda de amplios sectores de la comunidad académica sobre su necesidad inaplazable, en razón de los fines propios de la Universidad Contemporánea y de la urgencia, entre otros, de llenar los vacíos de conocimiento, inclusive sobre nuestra propia realidad y sobre sus potencialidades; justamente, en los días que nos alcanzan, cuando corresponde a la Ciencia papel protagónico para el avance de la Sociedad toda.

La Academia Colombiana de Ciencias, es consciente de la tarea que le compete en la consolidación de este proceso que entre nosotros, a diferencia de lo que sucediera en otros países, por una u otra circunstancia, apenas ha comenzado. En todos los certámenes que precedieron al establecimiento de los Programas de Doctorado, la Academia Colombiana de Ciencias, cuando quiera que tuvo la oportunidad de participar y exponer sus opiniones, insistió en la necesidad de incorporar la investigación científica a la Universidad, no sólo en razón

de su importancia intrínseca, de suyo decisiva, ni como una actividad colateral, sino como uno de sus quehaceres esenciales junto a la docencia y, por consiguiente, dentro de la más estrecha interacción con ella y con el fin explícito de mejorar su calidad y poder responder así, por la alta calidad académica y profesional de sus egresados.

Pienso que la puesta en práctica de esta estrategia de hecho implica la adecuación coherente de la estructura orgánica, y de los Estatutos Universitarios de tal modo que favorezcan el despliegue de las capacidades intelectuales y creativas de profesores y estudiantes en cuanto propicien la formación de "Grupos de Trabajo" o "Cátedras", en el sentido prístino de esta palabra, en torno a los catedráticos de mayor experiencia y calificación científica a quienes la Universidad, necesariamente, tiene que rodear de todos los recursos a su alcance, en función del logro de sus cometidos académicos y científicos. Máximo si se trata de Programas de Doctorado en los cuales la calidad científica y la experiencia de los profesores, puesta en evidencia por su trayectoria y la originalidad de sus aportes al conocimiento universal, es la mejor garantía de su solidez como de su capacidad para orientar a sus discípulos y de motivarlos para que puedan culminar sus estudios de Doctorado, como es de rigor, mediante la elaboración y sustentación en seminarios de un trabajo que reúna así mismo las condiciones de la originalidad, y el reconocimiento de la validez de sus aportes al avance del conocimiento en el campo respectivo por la comunidad científica nacional e internacional.

No me cabe duda que las Facultades de Ciencias que han asumido la responsabilidad de ofrecer Programas de Doctorado, en las diferentes disciplinas básicas, trabajando de consumo y con el apoyo decidido de las Entidades públicas y privadas, promotoras de la Ciencia en nuestro medio, podrán alcanzar estos objetivos.

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de ello estoy seguro, sabrá prestar su concurso en apoyo de los mismos objetivos y en concordancia con sus tradicionales cometidos de promover el fortalecimiento de la Ciencia, difundir sus logros, contribuir a mejorar la calidad de su enseñanza y estimular a quienes han dedicado sus vidas a estos mismos quehaceres.



## **DISCURSO PRONUNCIADO POR EL PRESIDENTE DE LA ACADEMIA EN LA SESION DE APERTURA DEL SEMINARIO "CAMBIO GLOBAL E INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES QUE PROVOCAN EFECTO DE INVERNADERO", EL 17 DE NOVIEMBRE DE 1995**

El certamen que hoy nos congrega, es el segundo que sobre el tema del "Cambio global y sus posibles causas y efectos", se celebra en nuestro país, en los dos últimos años, por iniciativa de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Si bien el primer Seminario tuvo por objeto el análisis de los aspectos generales interrelacionados con el fenómeno del cambio climático, del cambio global y del cambio climático y las metodologías para abordarlos en este segundo Seminario quiere la Academia, además de exponer los problemas, informar a la comunidad científica colombiana acerca de la gestación y desarrollo del Proyecto que adelanta la Academia Colombiana de Ciencias sobre el tema "CAMBIO GLOBAL E INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES QUE PROVOCAN EFECTO DE INVERNADERO", gracias a la ayuda financiera concedida por la Sociedad Alemana para la Cooperación Técnica GTZ, dentro del marco de las aportaciones del Gobierno de la República Federal de Alemania, acordadas en la Convención Climática de Ginebra para Colombia.

El interés y la firme decisión de la Academia de comprometer sus esfuerzos en la tarea de difundir los avances que se logren en el estudio de los problemas inherentes a las causas y efectos que producen el cambio climático global, particularmente de origen antropogénico y en referencia al territorio de Colombia, se remontan al año de 1988, cuando se estableció el Comité Colombiano del Programa Internacional GEOSFERA BIOSFERA. Desde entonces, la Academia Colombiana de Ciencias ha venido promoviendo la participación efectiva de Colombia en este Programa Internacional; y en verdad, no solamente concurriendo a las reuniones científicas internacionales que han tenido lugar en diferentes países, sino sobre todo, impulsando acciones y Proyectos concretos, en nuestro propio país.

En agosto de 1993, el Ministerio de Relaciones Exteriores puso al tanto a la Academia de Ciencias, sobre la obligación asumida por Colombia, y además, que para tal fin como país signatario de la Convención Marco de las Naciones Unidas, de presentar ante la Conferencia de las partes, información concreta acerca de la situación de las emisiones de gases de efecto invernadero, con base en estudios elaborados en el propio país, y además, para tal fin la República Federal de Alemania ofrecía apoyo a los países en desarrollo.

Fiel a la política institucional a la que he hecho referencia, la Academia Colombiana de Ciencias adelantó la elaboración de un Proyecto dentro de los términos fijados por el Ministerio de Relaciones Exteriores sobre "Evaluación del cambio climático e Inventario Nacional de Emisiones de gases de efecto Invernadero", el cual fue enviado al Ministerio de Relaciones Exteriores, para que a su vez, si lo considerase procedente,

fuese remitido a consideración del Gobierno Alemán, como en efecto ocurrió.

Posteriormente, el Ministerio del Medio Ambiente, a través de los Vice-ministros Doctores Eduardo Uribe Botero y Ernesto Guhl Nanneti, en su orden, avalaron la ejecución del Proyecto a cargo de la Academia Colombiana de Ciencias, con la obligación, por parte de ésta de mantener permanentemente informado de su desarrollo al Ministerio del Medio Ambiente.

En junio de este año, como culminación de este proceso, la Sociedad Alemana para la Cooperación Técnica, presentó a consideración de la Academia Colombiana de Ciencias, el texto del Acuerdo que suscribirían las dos Entidades. Fue así como el 7 de junio de este año, la Junta Directiva de la Academia le impartió su aprobación y el 1º de julio del presente año se puso en marcha su ejecución. Cabe destacar que al finalizar el pasado mes de septiembre, la Academia pudo ya presentar a la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica GTZ, el primer Informe de los trabajos ejecutados, en cumplimiento de las obligaciones contraídas.

Pienso que este eficaz comienzo, es garantía para el logro de los objetivos finales propuestos; sobre todo, si la Academia cuenta con el apoyo de las Entidades Colombianas públicas y privadas, directa o indirectamente interesadas en la ejecución exitosa del Proyecto, y sobre todo en que Colombia pueda dar cumplimiento a los compromisos adquiridos como país signatario de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio global.

Tal como tuve oportunidad de expresar con ocasión de nuestro primer Seminario sobre el Cambio Climático, la Academia es conciente de las dificultades de orden científico y logístico de suyo implícitas en este estudio; sobre todo en el desarrollo de las fases que habrán de seguir a las del Inventario, en cuanto deben de estar dedicadas a indagar por la magnitud del cambio climático en nuestro territorio, sobre las causas que lo producen y los impactos en los entornos físico y biótico, así como sobre sus consecuencias en los ámbitos económico y social. Estas consideraciones parten del reconocimiento de las singularidades del clima de Colombia, como país tropical, que de suyo exigen la elaboración de modelos interpretativos propios sobre las causas y efectos de los cambios climáticos; de tal modo que permitan derivar políticas y estrategias ecológicas y socioeconómicas concretas, adecuadas a nuestro entorno y a su contexto cultural.

El éxito dependerá del apoyo decidido del Estado, de la colaboración interinstitucional y del compromiso de la comunidad científica de sacar adelante este propósito. Pienso que los contactos y aproximaciones que se logren en desarrollo de este seminario, particularmente, en el nivel interinstitucional, contribuirán de manera eficaz al logro de esta meta.

No quisiera concluir estas palabras sin ántes expresar, en nombre de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, los debidos agradecimientos a las entidades y personas que nos han prestado su concurso para el buen suceso de esta tarea que es por supuesto, del interés de todos. En particular, expreso nuestro reconocimiento a la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica GTZ, por haber acogido nuestra solicitud; al Ministerio del Medio Ambiente por el respaldo político oficial concedido a nuestra iniciativa; al grupo de tra-

bajo Venezolano que adelanta en su país un Proyecto similar, por su oportuna y eficaz colaboración; a los investigadores bajo cuya responsabilidad, coordinación y dirección se ejecuta el Proyecto; a los conferencistas que contribuirán con sus aportes al logro de los objetivos de este seminario; a las entidades que colaboraron en el suministro de datos durante la primera fase de la ejecución del inventario. A los organizadores de este certamen y a las Entidades y personas que impulsaron de una u otra manera su realización.

## **DISCURSO PRONUNCIADO POR EL PRESIDENTE DE LA ACADEMIA EN LA SESION SOLEMNE DEL 29 DE NOVIEMBRE DE 1995, CON MOTIVO DE LA ENTREGA DE LOS PREMIOS QUE CONFIERE ACTUALMENTE LA ACADEMIA**

La reunión solemne que celebra la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, al finalizar el mes de noviembre de cada año, tiene un motivo y trascendencia singular: hacer entrega de los Premios que actualmente, previo concurso de méritos, a escala nacional, confiere nuestra Institución, a saber:

“Premio a la Obra Integral de un Científico” y “Premio Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales-Academia de Ciencias del Tercer Mundo para motivar a jóvenes investigadores”.

En esta oportunidad el Premio a la Obra Integral de un Científico ha sido otorgado a la Profesora Doña MARIA TERESA MURILLO PULIDO, Miembro de Número de nuestra Institución, en reconocimiento y exaltación de su obra científica, en el campo de la Sistemática de los Pteridófitos y a su consagración a esta laudable tarea por más de cuarenta años, como investigadora y Profesora del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia.

Asimismo, reciben hoy el premio Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales-Academia de Ciencias del Tercer Mundo, en razón de la calidad de los trabajos presentados, Doña MARIANNI YAJAIRA-CONVARIZA y Don CRISTIAN BLANCO TIRADO, egresados de la Carrera de Química de la Universidad Industrial de Santander, por su trabajo “Estudio comparativo de los aceites esenciales de hojas y frutos cítricos colombianos”, y con igual mérito, Don MARCO FIDEL SUAREZ HERRERA, egresado de la Carrera de Química de la Universidad Nacional de Colombia, por su trabajo “Estudio del proceso de transporte de calcio a través de la membrana parasitófora-plasmática de *Plasmodium falciparum*”.

Cumple así, una vez más, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con uno de sus objetivos institucionales prioritarios: reconocer los méritos y estimular a investigadores sobresalientes de la comunidad científica colombiana; por lo demás en pleno acuerdo con la ya tradicional política de la Academia Colombiana de Ciencias, de impulsar

la Ciencia en nuestro medio, tras la meta de hacer de ella, con el correr del tiempo, uno de los pilares en los que se afiance la cultura nacional.

No podría ser de otra manera, ante el hecho contundente de que el conocimiento científico es ya ahora mismo, y, con mayor razón habrá de serlo en el siglo XXI, el elemento de mayor impacto e influencia en las sociedades de todo el planeta y del cual van a depender a no dudarlo, las llamadas “ventajas comparativas” de los Estados y Naciones, según los posean en mayor o menor calidad y abundancia. De suyo, la mera presencia en este o aquel territorio de recursos naturales y materias primas en abundancia, ya no será el factor determinante de tales ventajas, como lo había sido hasta hace poco; sobretodo, ante el afianzamiento cada vez más firme, del paradigma del desarrollo sustentable que solamente podrá ser realidad, si se dispone de conocimientos suficientes y cada vez mejores, sobre el entorno.

Como bien lo señala la Comisión de Ciencia, Educación y Desarrollo, constituida por la pasada administración nacional, en su Informe conjunto “Colombia: Al filo de la Oportunidad”, la Ciencia, entendida como una forma de adquirir conocimientos orientados a comprender, explicar y transformar tanto al ser humano como al entorno que habita, ha dejado de ser una actividad de interés exclusivo de los científicos, pertenece ahora a toda la sociedad.

Pienso, sin embargo, que para que esto sea cierto en nuestro medio, es necesario promover cambios culturales e institucionales comenzando con la orientación de nuestro sistema educativo tradicional de estirpe formalista, como el que más, para dar cabida, en su remplazo, a métodos, actividades y enfoques que promuevan la comprensión clara de los conceptos de tal modo que puedan ser aplicados a la solución de problemas concretos de la realidad, y la asimilación crítica de los saberes, condición previa de la creatividad.

Las normas legales establecidas en los últimos años, tras estos objetivos y para el fortalecimiento de las Ciencias Exactas,



Aspecto de la Sesión solemne del 29 de noviembre de 1995 con motivo de la entrega de los Premios que confiere la Academia.



Doña María Teresa Murillo Pulido, ganadora del premio a la Obra Integral de un Científico; Don Víctor Albis, Bibliotecario; Don Santiago Dfáz, Director de la Revista; Don Luis Eduardo Mora, Presidente; Don Carlos Enrique Ruiz, Vice-Ministro de Educación, durante la sesión solemne realizada el 29 de noviembre de 1995 para la entrega de premios.

Físicas y Naturales, en nuestras Universidades, se traducirán en avances positivos, sobre todo, si los organismos gubernamentales encargados de hacerlos cumplir adoptan medidas eficaces para evitar que devengan en simples formalismos para llenar.

Así, la norma que obliga a las Universidades a constituir Facultades de Ciencias, so pena de perder tal carácter, no puede significar la adopción de simples reorganizaciones administrativas; sino la creación de espacios institucionales estables que permitan realmente disponer de facilidades financieras y logísticas y, de modo particular, de Profesorado de planta estable y altamente capacitado para las elevadas y difíciles responsabilidades de la docencia y la investigación fundamental, en las disciplinas particulares de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

El establecimiento de Unidades de Trabajo Académico, o Cátedras, en el sentido pristino de este vocablo, y no en de "clase" u "hora-clase" del lenguaje común, bajo la responsabilidad de los profesores de mayor experiencia, rodeados de facilidades financieras y logísticas, así como del personal auxiliar necesario, a manera de Unidades estructurales básicas de la Facultad de Ciencias, pudiera quizás, ser una estrategia que permita institucionalizar definitivamente la investigación científica como una de las actividades esenciales de la Universi-

dad. Sin embargo, tratándose de la Univeridad, tal institucionalización definitiva tiene que ser en estrecha interrelación con la docencia y tras el objetivo superior e irrenunciable de la más alta calidad de sus egresados.

Según el campo al que estuvieran dedicadas las Cátedras así concebidas, estarán adscritas a los diferentes Departamentos de la Facultad de Ciencias.

Señores Galardonados con los Premios de la Academia de Ciencias, Señor Vice-Ministro de Educación, Señores Académicos, Señoras y Señores:

Permitánme felicitar a quienes hoy reciben los Premios de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y señalar una vez más, ante tan distinguido Auditorio y ante la comunidad científica colombiana toda, sus destacados méritos científicos en sus respectivas jerarquías y campos del saber.

Asimismo, en nombre de la Academia Colombiana de Ciencias deseo expresar nuestro reconocimiento a la Academia de Ciencias del Tercer Mundo, por la generosa contribución financiera que anualmente pone a disposición de nuestra Entidad, con destino al premio para motivar a jóvenes investigadores.

## **PALABRAS PRONUNCIADAS POR EL ACADEMICO SANTIAGO DIAZ-PIEDRAHITA DURANTE LA ENTREGA DEL PREMIO A LA VIDA Y OBRA DE UN CIENTIFICO, EL 29 DE NOVIEMBRE DE 1995**

La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales tiene por objeto la investigación científica y su fomento, a la vez que la cooperación en el mejoramiento de la docencia en el campo de las ciencias en los distintos niveles de la enseñanza. En 1944, y en cumplimiento de una de sus normas estatutarias, la Academia creó los premios anuales Francisco José de Caldas y José Celestino Mutis para recompensar los mejores trabajos científicos que durante cada año calificara la corporación con el propósito de, por una parte intensificar la producción científica en el país, y por otro animar a los científicos extranjeros que se ocupan en el estudio de nuestra flora, fauna, geología, etnografía, y en general de nuestras riquezas naturales. Hace diez años, y teniendo en cuenta que las anteriores distinciones se habían vuelto inoperantes, la Academia estableció dos nuevos premios, esta vez destinados a la promoción y fomento de la investigación entre los investigadores menores de treinta y cinco años. Se trataba de los premios Academia Colombiana de Ciencias y Academia de Ciencias del Tercer Mundo, galardones que fueron convocados y entregados en dos oportunidades, la primera en 1987. En 1989 se reorganizaron estos premios y se mejoraron los estímulos con el fin de hacerlos más atractivos a la comunidad científica colombiana. A partir de 1990 los premios se han convocado para exaltar la obra integral de un científico, para galardonar un trabajo y para estimular a los investigadores jóvenes.

En atención a una honrosa designación de la Presidencia, debo dirigir unas palabras con motivo de la entrega de los galardones correspondientes a la convocatoria de los premios que concede la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales del presente año, comisión que cumpla gustosamente por las siguientes razones. Por motivos profesionales he tenido la oportunidad de compartir mi actividad profesional por más de tres décadas con la profesora María Teresa Murillo, galardonada con justicia con el premio a la obra integral de un científico. Se trata de la botánica más destacada de nuestro país, precursora en el estudio de la Pteridología en nuestro medio y de los estudios palinológicos. Quiero con la venia de los integrantes del jurado evaluador, citar las siguientes palabras del Acta que reflejan fielmente la actividad de la ganadora:

"Adoptamos la siguiente definición de científico: Aquél que con devoción, con perseverancia y capacidad, aplicando metodología rigurosa, con sana autocrítica y con sincera modestia dedica su vida a la búsqueda de la verdad y logra enriquecer el conocimiento preexistente de una manera ejemplar e inobjetable... La vida y obra de María Teresa Murillo se identifican estrictamente con esta definición.

Muy joven se vinculó al Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional, con que devoción y profundo cariño

ha dedicado toda su actividad al estudio de los Helechos. A ella se debe la excelente colección de Pteridófitos que ha curado por cerca de cincuenta años y a ella se deben numerosas publicaciones aparecidas a partir de 1956, entre las cuales sobresalen dos fascículos sobre las esporas monoletes y triletes, las revisiones de varios géneros, las claves para los helechos de Colombia, el tratamiento de los helechos para la Flora de Mutis, su libro sobre los usos de los helechos y numerosos artículos que sería engorroso citar en esta oportunidad.

Varios factores motivaron la vocación hacia la botánica y el amor por la flora de nuestro país. Tuvo la fortuna de nacer en el hogar del doctor Luis María Murillo, distinguido entomólogo y precursor del control biológico en nuestro medio, y recibir de él las primeras lecciones de historia natural. De él heredó el respeto por la naturaleza y gracias a él tuvo la fortuna de visitar desde pequeña el herbario, donde se familiarizó con las muestras de herbario y con la bibliografía especializada. Fue tal su interés, que desde muy joven fue vinculada al Instituto donde contó con maestros como el Dr. Armando Dugand, quien le sugirió especializarse en los helechos, grupo importante de plantas que no contaba con especialista en nuestro país. Gracias a su empeño y dedicación ha obtenido becas y pasantías en los mejores centros de la sistemática y es hoy una de las especialistas más reconocidas en el mundo, gozando del respeto y aprecio de sus pares.

No deja de ser significativo el hecho de que la galardonada sea una botánica sistemática. Actualmente hay déficit a nivel mundial de taxónomos y Colombia requiere de estudios sistemáticos por las siguientes razones:

El nuestro es un país con numerosos recursos naturales; la vegetación que cubre su territorio tiene como principal característica la exuberancia de su flora, una de las más ricas del universo y a la vez de las menos conocidas, a pesar de existir una tradición investigativa que supera dos centurias. El área geográfica del territorio continental es de 1.138.914 km<sup>2</sup> y en ella podemos distinguir ocho tipos de formaciones vegetales, entre las que se destacan el páramo, la selva neotropical, las formaciones de sabana y los manglares. Tanto las llanuras de la orinoquia, como la amazonia y el Chocó, así como los valles interandinos, las faldas y cimas de las cordilleras estuvieron totalmente cubiertas de manto vegetal, manto que se conserva en buena parte del territorio; tan sólo ciertas áreas presentan una vegetación discontinua ocasionada por las condiciones del suelo o por factores estrictamente antropogénicos.

La formación vegetal más extensa y que equivale a dos tercios del territorio es la de la selva neotropical que tuvo su origen en la vegetación de la era Terciaria, previa al levantamiento de las cordilleras. El surgimiento de los tres ramales andinos dio lugar a nuevas condiciones ecológicas y contribuyó a la formación de barreras naturales que aislaron poblaciones y favorecieron los procesos de especialización y de selección natural, dando lugar a numerosos géneros y especies, que con el paso del tiempo y con los cambios climáticos vinieron a ser acompañadas por entidades migratorias tanto holárticas como antárticas. La flora actual corresponde a una notable variedad de formas biológicas representadas en numerosas especies afines que se entremezclan en el espacio y que han alcanzado un

climax geográfico o máximo desarrollo biológico. Las familias que gobiernan la flora son eminentemente tropicales, siendo dominantes las orquídeas, las asteráceas, las rubiáceas, las melastomatáceas, las piperáceas y las bromeliáceas, para no citar sino las más frecuentes en todos los climas y paisajes. Ante esta riqueza de la flora se hacen necesarios abundantes trabajos de índole investigativa que se reflejen en catálogos florísticos adecuados, necesarios para el desarrollo técnico y científico y para la planeación, conservación y debido aprovechamiento de los recursos naturales.

Las investigaciones deben abarcar las siguientes áreas o aspectos de la botánica:

- Inventarios florísticos,
- Trabajos sistemáticos y evolutivos, reflejados en floras regionales, en la "Flora de Colombia" y en aportes a floras con un ámbito geográfico mayor como la "Flora Neotrópica",
- Estudios autoecológicos y sinecológicos,
- Estudios paleobotánicos y palinológicos que contribuyan a reconstruir la historia de la vegetación y del medio ambiente.
- Enseñanza de la botánica y divulgación,
- Aplicación de la botánica a programas de desarrollo.

Manteniendo una tradición investigativa y conservando los ideales de la Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada y de la Comisión Corográfica de los Estados Unidos de Colombia, el Padre Enrique Pérez Arbeláez creó en 1929 el Herbario Nacional Colombiano; en 1936, buscando un ámbito de permanencia y desarrollo para el mismo, promovió en la Universidad Nacional de Colombia la creación de un Departamento de Botánica que vino a convertirse en 1940 en el Instituto de Ciencias Naturales, entidad que a lo largo de sesenta años —entre otras actividades— se ha responsabilizado en llevar adelante el inventario florístico del país. En 1978 el Instituto, y como una muestra de la madurez investigativa alcanzada, asumió como un programa institucional el de preparar y publicar la obra "Flora de Colombia". Objeto central de este programa, cuya primera monografía apareció en 1983, es el de construir un sistema de facilidades de orden logístico y financiero dirigidas a facilitar la preparación y publicación paulatina de monografías a nivel de familia o de género, aprovechando la información acumulada en el Herbario Nacional Colombiano y en otros herbarios del mundo, y complementándola con nuevas colecciones, fruto de la herborización intensiva del territorio nacional.

La preparación de las monografías de la Flora de Colombia, ha servido como instrumento de integración entre la comunidad botánica de Colombia, a la vez que ha permitido estrechar los lazos de amistad y cooperación con entidades similares en el resto del mundo. No en vano Linneo llamó a la botánica, "la ciencia amable", éste ha sido el ambiente en el cual se ha adelantado la callada labor de Doña María Teresa Murillo Pulido, ambiente fructífero que le ha permitido desarrollar su vocación reflejada en múltiples publicaciones y en no pocos discípulos en el campo de la pteridología.

Felicitaciones a la profesora Murillo por este galardón en buena hora concedida.