

# ESTUDIO PRELIMINAR SOBRE EL PROCESO DE DENUDACION CARSIKA EN EL POLIGONO EXPERIMENTAL CUBANO-POLACO DEL PAN DE GUAJAIBON

ING. JUAN R. FAGUNDO CSc - ING. JULIO J. VALDES  
- LIC. JAVIER E. RODRIGUEZ - LIC. JESUS M. PAJON  
- LIC. ARGELIO DE LA CRUZ  
- LIC. ALBERTO GARCIA - DR. MARIAN PULINA

## RESUMEN

Se presentan los resultados preliminares de las investigaciones que se realizan en el área cársica del Pan de Guajabón, Cuba, en el marco del Proyecto Internacional para la Génesis y Evolución del Karst, (PIGEK), dirigido por la Comisión Internacional de Química-Física e Hidrogeología del Karst de la Unión Internacional de Espeleología (UIS). En el marco de este Proyecto, serán estudiadas algunas áreas cársicas y no cársicas de diferentes regiones climáticas del mundo, durante los mismos períodos y utilizando idénticas técnicas analíticas. El macizo del Pan de Guajabón en la provincia de Pinar del Río, fue seleccionado como área representativa del caso desarrollado en condiciones tropicales. En el invierno de 1984 se efectuó la primera expedición científica cubano-polaca a dicha área y los resultados que se reportan abarcan la caracterización hidrogeoquímica; la relación entre las concentraciones iónicas y parámetros químico-físicos de las aguas con la conductividad eléctrica, el pH y la temperatura, la respuesta a los impulsos de los diferentes sistemas hidrogeológicos desarrollados en el macizo con relación a el quimismo de las aguas; así como las primeras estimaciones sobre la denudación cársica en el área.

## INTRODUCCION

En el marco de los proyectos de trabajo de la Comisión Internacional de Química-Física e Hidrogeología del Karst de la UIS, en enero de 1984 se inició el programa de investigaciones conjuntas cubano-polacas sobre la denudación y evolución del karst en condiciones tropicales.

Su objetivo fundamental es determinar en forma cuantitativa, mediante una misma metodología de trabajo, la intensidad del proceso de denudación química y mecánica en zonas cársicas ubicadas en diferentes áreas climáticas.

Otro propósito de este estudio es conocer cuantitativamente los procesos de interacción agua-roca y evaluar los efectos del clima, la litología, los factores biológicos, hidrogeológicos, etc., en estos procesos y en la composición química y calidad de las aguas.

Además, es interés corroborar la eficiencia de modelos químico-físicos y geomatemáticos en el conocimiento de los fenómenos cársicos.

Como polígono experimental tropical fue seleccionado el Pan de Guajabón y sus alrededores donde con anterioridad la parte cubana había desarrollado estudios espeleológicos, geoquímicos y geomatemáticos y donde existen condiciones geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas apropiadas para este tipo de estudios.

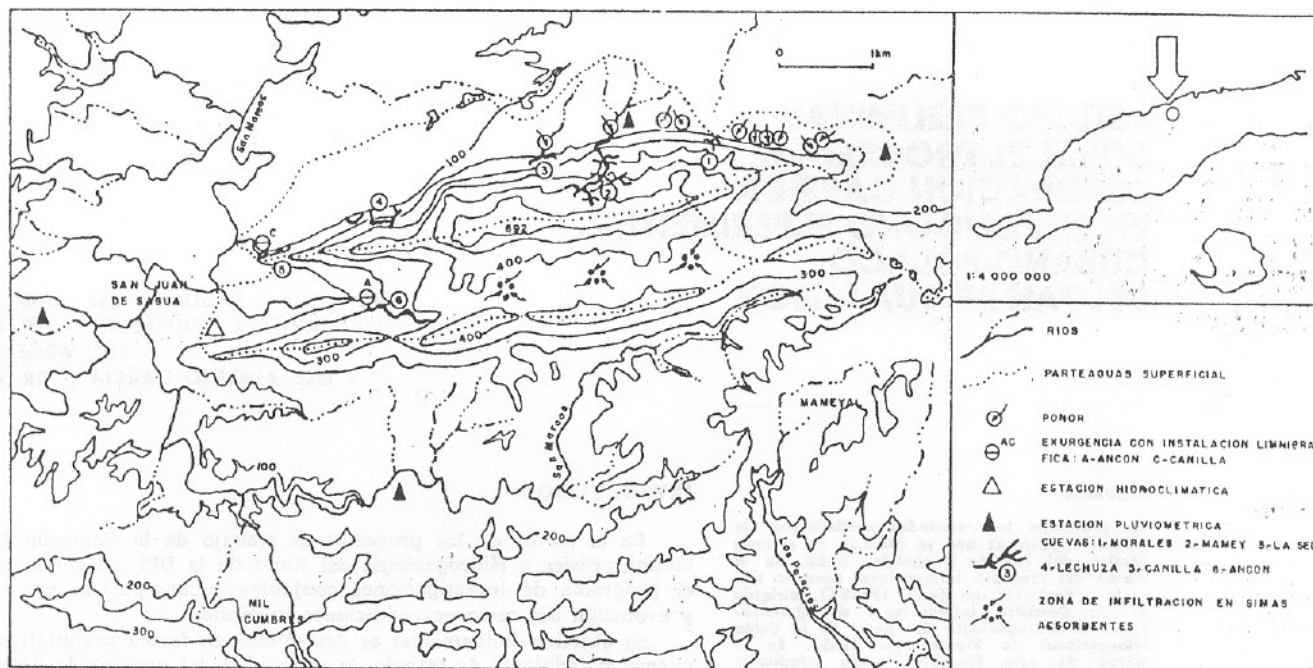
Es necesario destacar la importancia práctica que estos estudios revisten en países como el nuestro que posee más de un 65% de su territorio constituido por rocas carbonatadas. No existe hasta el momento en Cuba una adecuada metodología de trabajo que permita cuantificar ni hacer pronósticos del efecto antrópico sobre el medio. Las grandes transformaciones socio-económicas que se efectúan en nuestro país cambian en forma drástica en ocasiones las propiedades físicas y químico-físicas de los acuíferos y el medio geológico, se contaminan las aguas, se afectan los suelos, etc. En ocasiones ocurren desastres y afectaciones económicas, producto de la aceleración de la denudación química. En otros casos, por desconocimiento de la dinámica del caso se hacen obras que crean inundaciones y otras afectaciones. Resulta evidente que es imposible un uso racional de los recursos de la naturaleza desconociendo científicamente el medio ambiente cársico, que es el más importante de los nuestros. El objetivo de este trabajo es presentar algunos de los resultados obtenidos durante la primera campaña geoquímica correspondiente a los meses de enero y febrero de 1984.

## ASPECTOS DE LA GEOGRAFIA, GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DE LA REGION

La sierra del Pan de Guajabón se encuentra ubicada en la sierra del Rosario, cordillera de Guaniguanico, en la provincia de Pinar del Río (Fig. 1). Comprende un área de 13 km<sup>2</sup>. La región se caracteriza por una geología compleja tanto por su litoestratigrafía como por su estructura, a consecuencia de los procesos de transporte tectónico y desplazamiento diferencial de rocas en formas de mantos de cabalgamiento y

otros fenómenos propios de la tectónica de sobrecojimiento.

El macizo montañoso está formado por dos elevaciones carbonatadas, sierra del Pan de Guajabón y sierra Chiquita, separadas por una depresión elevada. En la región están presentes secuencias de las formaciones geológicas Guajabón y Chiquita respectivamente, constituidas por calizas masivas y areniscas, así como por depósitos paleógenos donde existen olistostromas que contienen bloques y fragmentos de calizas, areniscas, diabasas y ser-



1. Mapa hidrológico generalizado del macizo del Pan de Guajabón y su localización en el occidente de Cuba.

pentinitas. En las calizas existen además intercalaciones de bauxitas.

Desde el punto de vista hidrogeológico, están presentes dos sistemas de drenaje. El primero, desarrollado en el macizo del Pan de Guajabón, presenta una zona de alimentación alóctona hacia el noroeste de la sierra, constituida por varios arroyos superficiales que poseen un breve recorrido epigeo. De ellos el arroyo Mamey es el único que nace fuera del macizo cársico, mientras que los restantes, con cuencas muy pequeñas, surgen en el propio macizo carbonatado. Estos arroyos penetran dentro del macizo a través de ponores, se mezclan con las aguas autóctonas y surgen en la llamada Surgencia Canilla. A este sistema están asociadas las cuevas Mamey, Lechuza y Canilla, con más de 8 km de galerías subterráneas recorridas hasta el presente (1).

El otro sistema subterráneo posee una zona de alimentación en la depresión elevada, donde existe un gran número de dolinas y algunos arroyos que poseen muy breve recorrido superficial. A este sistema está asociada la cueva Ancón, donde en el curso de esta expedición se exploró y cartografió 1 km de recorrido subterráneo. Las aguas que emergen de la exurgencia

Ancón, a diferencia de las anteriores, no experimentan cambios apreciables en sus contenidos iónicos y propiedades organolépticas cuando se producen grandes precipitaciones en la región.

#### BASE EXPERIMENTAL

El polígono experimental fue instalado en un área del Parque Nacional Mil Cumbres, destinado al estudio y conservación de la flora y la fauna.

Para el registro de las condiciones hidrometeorológicas fueron instalados durante la expedición: 4 pluviómetros, 2 limnigrafos, una estación hidroclimática equipada con pluviógrafo, higrómetro, barógrafo, psicrómetro y termómetros de máxima y mínima (Fig. 1). Además, se dispuso de la información registrada en la estación hidrometeorológica de La Palma.

Se llevaron a cabo mediciones de caudales, estableciéndose la relación entre gastos y niveles medidos por limnigrafos. Los análisis químicos fueron efectuados en el campo mediante las técnicas de Markowicz y Pulina (3), así como las determinaciones de temperatura, pH, y conductividad. Estos pa-

rámetros fueron registrados además, mediante estaciones automáticas. Esta información fue posteriormente procesada mediante el modelo químico-físico de interacción agua-roca AGMAR, implementado mediante un algoritmo matemático en FORTRAN IV (2).

El programa de investigación contempla como mínimo dos campañas geoquímicas (en períodos seco y húmedo de 1984) y un muestreo sistemático mensual durante el año.

#### RESULTADOS Y DISCUSION

##### Caracterización geoquímica

Aunque todas las aguas de la región son del tipo hidrocarbonatada cálcica, existen (como se aprecia en la Fig. 2) ligeras diferencias en la composición química relativa entre las del sistema Mamey-Canilla y el sistema Ancón; especialmente la relación  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ , es mayor en estas últimas.

La conductividad y demás parámetros asociados a ésta (dureza, mineralización y concentración de los iones mayoritarios), es más alta en las aguas

que entran al sistema Mamey-Canilla que en las que salen, alcanzando las de las cuevas Mamey y Lechuza valores más bajos. También es más pequeño el contenido de  $\text{CO}_2$  en las aguas de cuevas, mientras que el pH es ligeramente mayor. Todas estas aguas en general se encontraban sobresaturadas respecto a la calcita y la dolomita en el periodo seco.

En el sistema Ancón no se apreciaron cambios significativos en la conductividad y los parámetros relacionados en las distintas zonas hidrogeológicas (arroyos ubicados en la zona de alimentación, en la cueva y en el arroyo después de la emergencia). El contenido de  $\text{CO}_2$  es mayor en estas aguas que en las del sistema Mamey-Canilla, con un pH por lo general menor. Con relación a la calcita sólo un agua resultó insaturada (en la zona de alimentación) y con respecto a la dolomita mucho

menos saturadas que las del otro sistema.

#### *Relación entre los contenidos iónicos y parámetros asociados con la conductividad.*

Las relaciones entre las concentraciones iónicas y otros parámetros asociados, con respecto a la conductividad, arrojaron resultados muy similares en ambos sistemas, para los iones bicarbonato, sulfato, cloruro, la mineralización y la dureza (Tabla 1). No obstante, se encuentran ligeras diferencias en las relaciones del magnesio y sodio-potasio con la conductividad, es decir, la parte catiónica.

Las correlaciones para el sistema Mamey-Canilla fueron altamente significativas en todos los casos excepto el ión sulfato. Para el sistema Ancón no se encontraron correlaciones significa-

tivas lo cual se asocia a la pequeña variabilidad de la composición para ese sistema

Estos resultados pueden servir en el futuro para el control sistemático de la concentración iónica y un gran número de índices químico-físicos y geoquímicos característicos de las aguas, mediante simples mediciones *in situ* de temperatura, el pH y la conductividad.

#### *Contenido de $\text{CO}_2$ en la atmósfera exterior, en las cuevas y en las aguas.*

En la tabla 2 se exponen los resultados de las mediciones de  $\text{CO}_2$  en el aire exterior, en la atmósfera de las cavidades y en las aguas; en el aire exterior, se registró una concentración de 0.9 mg/l y en la atmósfera de las cuevas del Ancón y el Mamey, esta fue como promedio de 3.6 y 3.2 mg/l respectivamente. Este valor

## 2. Caracterización geoquímica de las aguas del Pan de Guajabón.

	SISTEMA MAMEY-CANILLA				SISTEMA ANCON		
	A. Mamey	C. Mamey	C. Lechuza	Surgencia Canilla	Depresión Central	C. Ancón	Surgencia Ancón
	<div> <div>CI</div> <div>S</div> <div>N</div> <div>M</div> <div>B</div> <div>C</div> </div>	<div> <div>CI</div> <div>S</div> <div>N</div> <div>M</div> <div>B</div> <div>C</div> </div>	<div> <div>CI</div> <div>S</div> <div>N</div> <div>M</div> <div>B</div> <div>C</div> </div>	<div> <div>CI</div> <div>S</div> <div>N</div> <div>M</div> <div>B</div> <div>C</div> </div>	<div> <div>CI</div> <div>S</div> <div>N</div> <div>M</div> <div>B</div> <div>C</div> </div>	<div> <div>CI</div> <div>S</div> <div>N</div> <div>M</div> <div>B</div> <div>C</div> </div>	<div> <div>CI</div> <div>S</div> <div>N</div> <div>M</div> <div>B</div> <div>C</div> </div>
N	1	2	3	4	5	6	7
$\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$	4.3	5.6	5.0	6.1	6.2	11.4	13.1
$\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3$	0.6	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0	0.9
SPC	500	258	205	302	330	344	343
DU	194	139	100	147	160	177	172
$\text{PCO}_2 \cdot 10^3$	1.9	1.1	0.7	2.0	2.3	2.1	2.0
pH	8.15	8.18	8.25	7.98	7.93	7.96	8.02
RSC	0.83	0.51	0.35	0.34	-0.33	0.50	0.55
RSD	1.24	0.45	0.18	0.09	-0.07	0.14	0.12



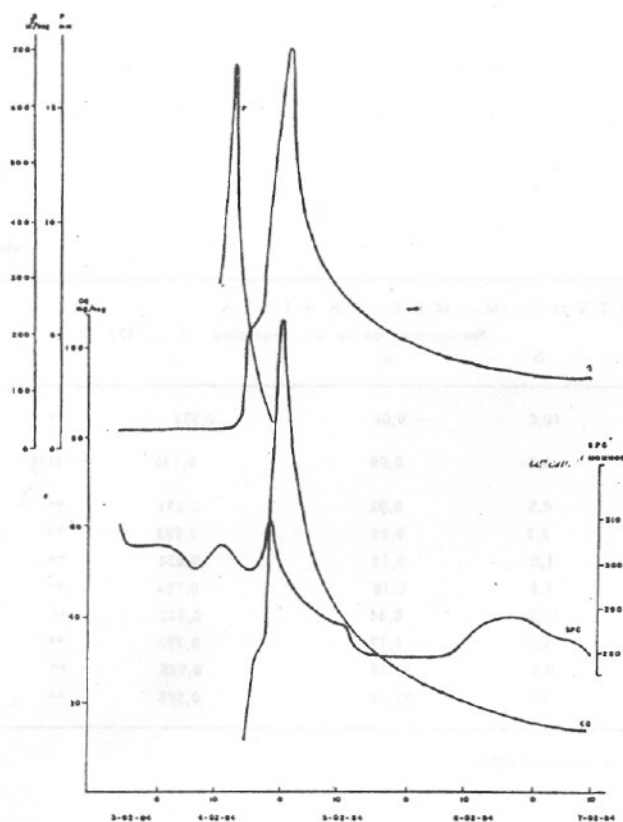
Concentración de cada ión (Cl)	Sistema Ancón Cl/SPC (Valor medio)	SISTEMA MAMEY CANILLA				
		Cl/SPC (valor medio)	b	a	Parámetros de la ec. regresión (N = 17) r	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> . 10 <sup>3</sup>	9,8	9,7	10,0	- 0,06	0,972	**
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> . 10 <sup>3</sup>	0,5	0,5	0,2	0,08	0,190	N/S
Cl <sup>-</sup> . 10 <sup>3</sup>	1,8	1,6	0,5	0,32	0,691	**
Ca <sup>2+</sup> . 10 <sup>3</sup>	8,6	9,3	8,2	0,08	0,983	**
Mg <sup>2+</sup> . 10 <sup>3</sup>	1,5	0,8	1,0	0,13	0,824	**
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> . 10 <sup>3</sup>	2,3	1,6	1,6	0,15	0,786	**
b/Cl . 10 <sup>3</sup>	12,0	13,0	11,0	0,34	0,982	**
b/ΣM .	0,7	0,9	0,7	- 6,17	0,993	**
b/Dureza	0,5	0,5	0,5	11,79	0,985	**
b/TDS	0,9	0,9	0,8	22,19	0,975	**

Relaciones entre contenidos iónicos y parámetros relacionados (Cl) con la conductividad.

Tabla No. 2

Contenido de CO<sub>2</sub> en el aire, la atmósfera de las cuevas y en las aguas de la sierra del Pan de Guajalón durante el invierno de 1994. (N) Número de muestras

Sistema Hidrogeológico	Punto de Muestreo	CO <sub>2</sub> en el aire (mg/l) (N) Conc. media		CO <sub>2</sub> en el agua (mg/l) (N) Conc. media	
Mamey-Canilla	Sumidero A. Mamey	—	—	(1)	0,0
	C. Mamey (rfo subterráneo)	(1)	6,3	(3)	0,7
	C. Mamey (Infiltración)	(2)	1,8	(3)	0,4
	C. Lechuza (gours o infiltración)	—	—	(5)	0,0
	C. Canilla (gours)	—	—	(2)	0,0
	Surgencia Canilla	—	—	(6)	2,0
	C. Canilla (rfo subterráneo)	—	—	(1)	1,1
Promedio general		3	3,2	(21)	0,8
		[Interior]			
Ancón	Depresión Central	—	—	(6)	11,3
	C. Ancón (Infiltración)	—	—	(3)	3,7
	C. Ancón (gours)	(1)	2,7	(2)	0,5
	C. Ancón (rfo subterráneo)	(2)	4,1	(10)	4,3
	Surgencia Ancón (exterior)	(1)	0,9	(6)	4,4
	Arroyo Ancón (perfil)	—	—	(4)	2,5
	Promedio Interior	(3)	3,6	(31)	5,1
Exterior		(1)	0,9		



3. Variación de SPC, Q y CQ por efecto de las precipitaciones en el resolladero del arroyo Canilla.

medio para las cavernas supera en 4 veces a los observados para el aire atmosférico exterior.

El contenido de  $\text{CO}_2$  de las aguas asociadas al sistema Ancón ( $5,1 \text{ mg/l}$ ) fue en general muy superior al de las aguas asociadas al sistema Mamey-Canilla ( $0,8 \text{ mg/l}$ ) lo que demuestra, en el primer caso, la cercanía a una fuente de gran actividad micro-biológica. Los máximos valores ( $11,5 \text{ mg/l}$ ) se registraron en los arroyos que corren por la depresión central, donde se encuentra la zona de alimentación de dicho sistema.

#### Variación diurna de la conductividad, pH y la temperatura

En la tabla 3 se presentan los resultados de la variación diurna de la conductividad, el pH y la temperatura, en las estaciones de registro automático instaladas en las emergencias de Canilla y Ancón entre los días 22 de enero y 7 de febrero de 1984. Aún cuando las precipitaciones no tuvieron la misma distribución en ambos sitios, el volumen de las mismas fue similar (del orden de 38 mm). El coeficiente de variación de la temperatura fue similar en ambos sistemas ( $0,3\%$ ) y los coeficientes de variación correspondientes al pH y la conductividad fueron superiores en la surgencia Canilla que en Ancón.

#### Relación entre las precipitaciones, los caudales y el quimismo del agua.

Un resultado interesante, es la relación que se experimenta en las aguas entre el caudal y las concentraciones iónicas, producto de una brusca precipitación en un área cársica. Estos cambios permiten conocer la respuesta de un macizo determinado a los impulsos hidrológicos; pues a partir de la forma de las curvas generadas, se obtiene información sobre las características del drenaje subterráneo y la constitución interna del acuífero.

El pluviógrafo del caserío de Sagua registró unas precipitaciones de 37,2

Coefficientes de Variación (Cv)

Parámetros	Canilla		Ancón	
	N	Cv	N	Cv
T	83	0,31	189	0,34
PH	83	9,88	139	1,14
SPC	84	3,26	168	2,08

Variación diurna de la T, PH, SPC

mm entre las 14 y 24 horas del día 4 de febrero (figura 4). La respuesta del caudal químico en el sistema Mamey-Canilla se produjo a las 8 horas, mientras que la variación del quimismo (medida en términos de conductividad) ocurrió a las 24 horas. Como resultado de estas lluvias el caudal químico (Volumen de  $\text{CaCO}_3$  movilizado por las aguas por unidad de tiempo), también experimentó un cambio apreciable, del orden de 5,6 kg de  $\text{CaCO}_3$  en 40 horas.

#### Cálculo preliminar de la denudación química local

La determinación del potencial de denudación química en la región se realizó a partir del método hidrométrico desarrollado por Pulina (3), (5) en el cual se expresa la denudación como los  $\text{m}^3/\text{km}^2$  año o  $\text{mm}/1000$  años, tomándose como datos para el cálculo el caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ); la mineralización  $\Sigma \text{M}$  ( $\text{mg/l}$ ) calculada a partir de la conductividad eléctrica de las aguas a  $25^\circ\text{C}$ ; el área de la cuenca hidrogeológica ( $\text{km}^2$ ) y el coeficiente  $\alpha$  que depende de la litología (12,6 para los carbonatos).

Para la cuenca del sistema Mamey-Canilla el estimado preliminar de denudación (enero-febrero de 1984) fue de  $48,0 \text{ m}^3/\text{km}^2$ , mientras que para la cuenca del sistema Ancón fue de  $41,5 \text{ m}^3/\text{km}^2$  (4). Estos valores son sólo orientativos, puesto que se requiere más de un año hidrológico para obtener estimados representativos.

#### BIBLIOGRAFIA

- De la Cruz A, Valdés, J. J.: Caracterización geoquímica y geomatemática de las aguas de la sierra del Pan de Guajabón y sus inmediaciones. S. del Rosario, Pinar del Río. Manuscrito inédito.
- Fagundo, J. J., Valdés, J. J.: Nuevo algoritmo para el cálculo de parámetros o índices químicofísicos y geoquímicos en aguas naturales altamente mineralizadas. Rev. CENIC. En prensa, 1985.
- Markowicz, M. y Pulina, M.: Iloscowa Polmikroanaliza Chemiczna Wod W. Obszarach Krasu Weglanowego. Uniwersytet Slaski, Katowice, 67, 1979.
- Pulina, M., Fagundo, J. J., Valdés, J. J.; Rodríguez, J. E.; Kozik, A.; Leszkiewicz, J.; Glowacki, P.; Palon, J.; De la Cruz, A.; García, A. The dynamic of the contemporary karstic processes in the tropical area of Cuba. Preliminary report of the field investigations performed by the expedition Guajabón 84 in the winter season 1984. Univ. Slaski. Sosnowice 40 pp.
- Pulina, M.: Denudacja Chemiczna Na obszarach Krasu Weglanowego. Polska Akademia Nauk. Prace Geograficzne HR 105; 159 pág. 1974.