



## DENUDACIÓN QUÍMICA EN LA CUENCA SUR DE LA HABANA

P. González<sup>1</sup>, M. Suárez<sup>1</sup>, J. R. Fagundo<sup>1</sup>, R. M. Valcarcer<sup>2</sup>, C. Melián

<sup>1</sup> Centro Nacional de Termalismo "Víctor Santamarina". Ave: 243, No 19815, Fontanar, Boyeros Ciudad Habana. C.P 19250. E-mail [Patricia@rsrch.isctn.edu.cu](mailto:Patricia@rsrch.isctn.edu.cu)  
<sup>2</sup> Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"

### RESUMEN

*Desde el pasado siglo numerosos investigadores, han llevado a cabo estudios cuantitativos para determinar la intensidad de los procesos de disolución de las rocas carbonatadas, con el objetivo de interpretar la transformación del relieve en esos terrenos, comparar la velocidad de la erosión en diferentes medios y latitudes, así como para entender la naturaleza de los procesos. Tomando como base estos estudios, este trabajo se propuso realizar un cálculo de la denudación química en la Cuenca Sur de la Habana, particularmente del Sector Hidrogeológico Güira-Quivicán. Utilizando datos hidrogeológicos e hidroquímicos de esta zona, se realizan los cálculos de la denudación química en la zona de alimentación, de emisión y la denudación total del acuífero, mostrando la gran corrosión química a la que está sometido este acuífero producto de la intrusión marina.*

**Palabras claves:** Denudación química, Cuenca Sur

### ABSTRACT

*Numerous investigators, since the last century, have carried out quantitative studies to determine the intensity of the processes of dissolution of the carbonated rocks, with the objective of interpreting the transformation of the lands, to compare the speed of the erosion in different media and latitudes, as well as to understand the nature of the processes. With these studies as base, this work intended to carried out a calculation of the chemical denudation in the South Basin of Havana, particularly of the Hydrogeological Sector of Güira-Quivicán. Using hydrogeological and hydrochemical data of this area, there is calculated the chemical denudation in different areas and the total denudation of the aquifer, showing the high level of chemical corrosion of this aquifer as a result of the marine intrusion.*

**Key words:** Chemical denudation, Southern Basin

### INTRODUCCIÓN

Desde el pasado siglo numerosos investigadores, especialmente geomorfólogos, carsólogos e hidrogeólogos, han llevado a cabo estudios cuantitativos para determinar la intensidad de los procesos de disolución de las rocas carbonatadas por las aguas subterráneas, a lo que se conoce con el término denudación química, con el objetivo de interpretar la transformación del relieve en esos terrenos, comparar la velocidad de la erosión en diferentes medios y latitudes, así como para entender la naturaleza de los procesos (Ford y Williams, 1989).

A mediados del pasado siglo el geomorfólogo Jean Corbel (en: Ford y Williams, 1989) creó un gran impacto en la comunidad científica especializada, al presentar los resultados obtenidos a partir de miles de mediciones de campo en diferentes países. Según sus cálculos, la denudación química era más intensa en las altas montañas de los países templados, atribuyéndole a la temperatura el papel principal en estos procesos, debido a la mayor solubilidad del CO<sub>2</sub> a bajas temperaturas. Estas consideraciones fueron objeto de muchas disputas por parte de otros geomorfólogos, sobre la base de las evidencias de

campo, quienes planteaban que los procesos de intemperismo eran más rápidos en condiciones de clima húmedo y caliente.

Los trabajos de tipo cuantitativo que quedaron interrumpidos a la muerte de Corbel en un accidente, fueron continuados por Pulina (1974), quien encontró que existía una relación lineal entre la denudación química y las precipitaciones, así como por Gams (1972) y Priesnitz (en: Ford y Williams, 1989), quienes demostraron que la denudación química dependía del escurrimiento. Las magnitudes más intensas de la denudación fueron determinadas por Maire (1981) en una región de Nueva Guinea, donde las precipitaciones medias anuales son extraordinariamente elevadas, del orden de 5700-12000 mm.

Entre 1984 y 1989 se desarrolló un programa de investigación auspiciado por la UNESCO denominado PIGEK (Programa de Investigación sobre la Génesis y Evolución del Karst), seleccionándose polígonos experimentales en Polonia y Bulgaria; la isla de Spitsbergen y Cuba, representativos de carcos desarrollados en condiciones de clima templado, polar y tropical respectivamente, donde quedó demostrado el papel dominante de las precipitaciones y las condiciones más favorables del clima húmedo y caliente en los procesos de denudación química (Pulina, *et al.*, 1984; Rodríguez, *et al.*, 1989; Fagundo, *et al.*, 1986; Rodríguez y Fagundo, 1995).

En las regiones cársicas costeras con relieve de llanura, los primeros trabajos en que se midió la magnitud de la denudación química se deben a Back, *et al.*, (1979), quienes calcularon la cantidad de masa química que es eliminada por disolución en una cuenca subterránea ubicada en la Península de Yucatán, la cual, desde el punto de vista geológico, geomorfológico e hidrogeológico presenta muchas similitudes con la Cuenca Sur de La Habana.

Tomando en consideración que en el área de estudio en Yucatán no existían corrientes superficiales y que toda la descarga de los acuíferos se producía en las proximidades de la línea de costa, Hanshaw y Back, (1980) estimaron la recarga total del sistema acuífero a partir de la diferencia entre las precipitaciones medias anuales y la evapotranspiración, determinada esta última mediante una expresión empírica dependiente de la temperatura. La recarga anual estimada (equivalente a la descarga) fue de  $9.8 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ . Según los cálculos realizados por los referidos investigadores, cada litro de agua que se mueve en forma subsuperficial en la cuenca aporta 2.5 mmol de calcita disuelta, de modo que, considerando la superficie de la cuenca ( $65 \ 500 \text{ km}^2$ ), la magnitud de la denudación química calculada fue de  $24,5 \cdot 10^{10}$  moles de calcita por año, equivalente a 37.5 toneladas métricas por cada  $\text{km}^2$ . Esas cifras eran coherentes con los experimentos de laboratorio y a partir de ellos, estimaron que la caleta Xel Ha, en la península de Yucatán puede disolverse químicamente en 3 000 años (Back, *et al.*, 1979). Tomando como base estos estudios, este trabajo se propuso realizar un cálculo de la denudación química en la Cuenca Sur de la Habana, particularmente del Sector Hidrogeológico Güira-Quivicán.

### **Marco geográfico, geológico e hidrogeológico**

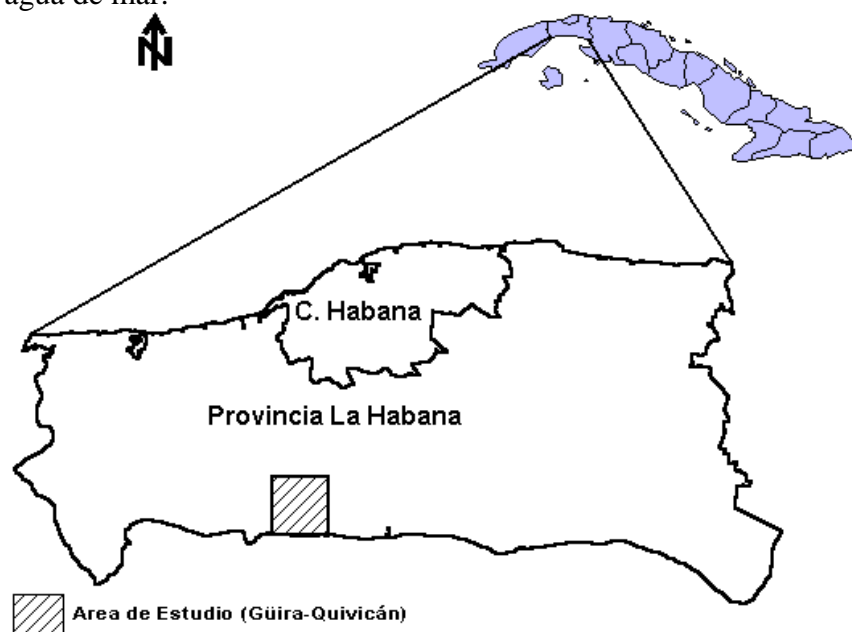
El área seleccionada pertenece al sector hidrogeológico Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana, ubicado entre las coordenadas N 320-345 y W 340-370. Dicha área posee una superficie de unos  $50 \text{ km}^2$  y sus cotas absolutas varían entre 1.00 y 20.00 m sobre el nivel de mar. La región está constituida por rocas carbonatadas muy carsificadas de edad Neógeno, pertenecientes a las formaciones Jaruco, Husillo, Cojimar y Güines. Estas rocas son muy acuíferas, su trasmisividad varía entre 5000 y 50000  $\text{m}^2/\text{d}$ , mientras el coeficiente de almacenamiento alcanza valores desde 0.15 en condiciones de acuífero libre, hasta 0.005 en condiciones de semiconfinamiento (González, 1997).

Las precipitaciones medias anuales en esta área son de 1398 mm (Barros y León, 1997), algo menores que la media nacional. A pesar del volumen de lluvia, el buen drenaje de los suelos, el alto grado de

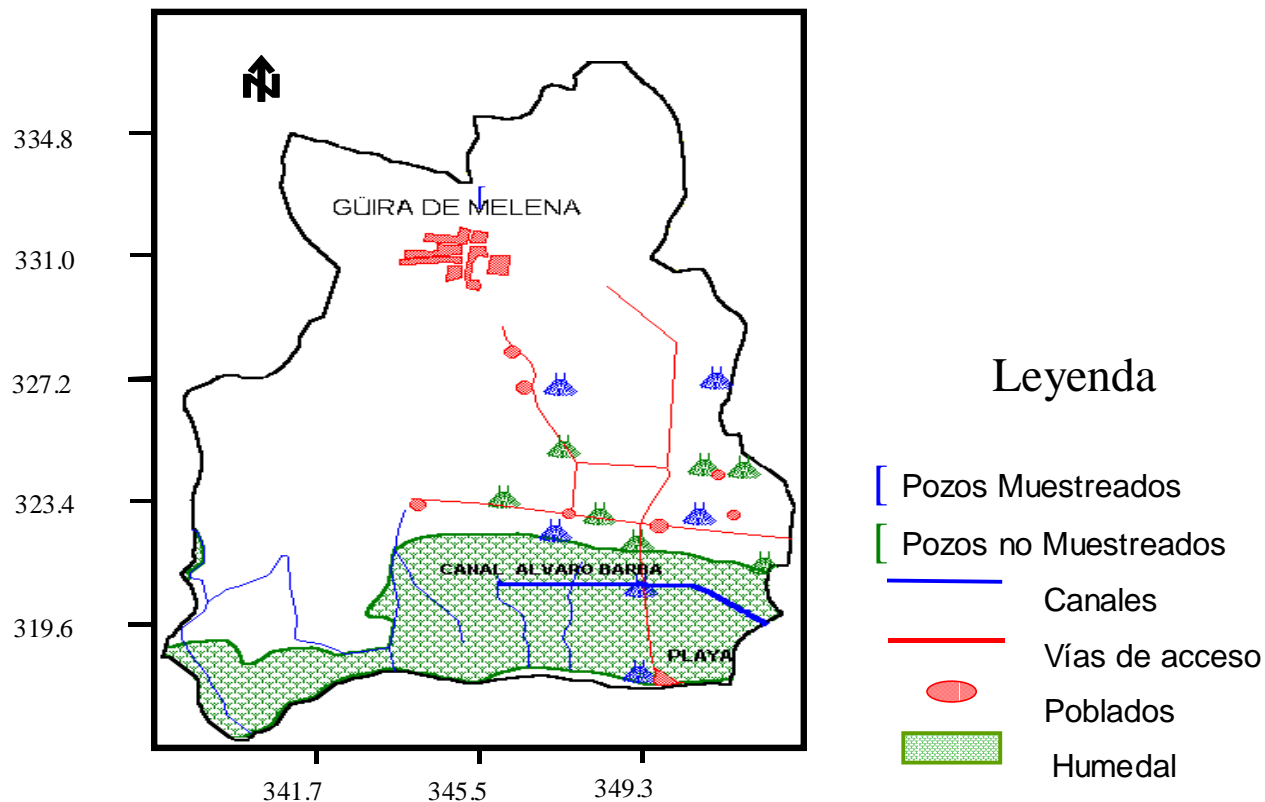
carsificación de las rocas; así como la gran trasmisividad del acuífero, existe un déficit de recursos hídricos en este sector de la cuenca debido a varias razones. En la década del 70 se realizaron obras de canalización que incrementaron el drenaje de las aguas subterráneas de la zona cenagosa, lo cual provocó un desplazamiento de la interfaz agua dulce-agua de mar tierra adentro. Otro factor que ha contribuido a la salinización de las aguas subterráneas en la región es la intensa explotación a que ha sido sometido el acuífero para el abasto a la población habanera y para el riego de las plantaciones agrícolas. Los acueductos agrupados en un campo de pozos han llegado a extraer un caudal del orden de  $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$  y los sistemas de riego de  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$  (López, 1992, en: Jiménez et al., 1997.). Entre los años 1984 y 1987 se alcanzaron los valores máximos de explotación en este territorio. Esta situación, unida a una disminución en el régimen de lluvia por debajo de la media anual, incrementó aún más la intrusión marina en el acuífero, por lo cual se tomaron medidas correctoras tales como la regulación del régimen de explotación, la construcción del Conjunto Hidráulico Pedroso-Mompostón-Güira consistente en un sistema de presa y derivadora que conduce el agua superficial a través de un canal para uso agrícola en el área; así como la construcción del Dique Sur, consistente en una barrera impermeable que sobresale entre 1.0 y 1.5 m sobre el nivel del mar. Todo ello, junto al restablecimiento del régimen normal de precipitación, ha contribuido a aumentar el nivel del agua subterránea, desplazar la interfaz agua dulce-agua de mar hacia la costa y mejorar la calidad de las aguas (González, 1997).

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el área de estudio (Fig. 1) se estableció una red de observaciones sistemáticas para el monitoreo de los niveles piezométricos y la calidad de las aguas. Fue seleccionado un perfil de pozos orientados en dirección N-S (Fig 2). Las muestras fueron tomadas mensualmente a partir del mes de enero de 1997, en tres niveles de profundidad, representativos de las zonas de agua dulce, de mezcla y de interfaz entre el agua dulce y el agua de mar.



**Figura 1.** Localización del área de estudio



**Figura 2.** Ubicación de la red de muestreo

Las mediciones de los parámetros geoquímicos (pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, potencial redox) se realizaron "in situ" mediante pHmetro y medidor de temperatura y potencial redox (Eh), modelo HI-8424 marca HANNA, oxímetro HANNA modelo HI 914, conductímetro modelo HI 902 HANNA. Los contenidos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , así como la alcalinidad total ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ) fueron también determinados en el campo, según las técnicas de Markowicz y Pulina, (1974), mientras que los restantes macroconstituyentes ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y componentes trazas se analizaron en el laboratorio antes de las 24 horas de tomada la muestra. Las marchas analíticas se efectuaron mediante las técnicas analíticas estándar (APHA, AWWA, WPCF, 1989). Los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  fueron determinados por fotometría de llamas (fotómetro marca SOLAR 919 de la UNICAM). La calidad de los datos fue validada mediante el balance iónico y el cálculo de las conductividades eléctricas teóricas basado en el modelo de Miller et al. (1986), implementado en el sistema informático HIDROGEOWIN (Alvarez et al., 1998), con el cual se calcularon además los índices de saturación y otros indicadores geoquímicos. El resto del procesamiento se efectuó mediante EXCEL.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Determinación de la denudación química en el área de estudio

#### Equivalencias:

1 año = 31 104 000 segundos (s); 1 s =  $3.215 \times 10^{-8}$  años.

1 ml =  $1 \text{ cm}^3$ , 1 l =  $1 000 \text{ cm}^3 = 1 000 (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$

1 mmol =  $10^{-3}$  moles; 1 mol calcita = 100 g calcita =  $10^{-1}$  kg calcita

1 Tonelada métrica (TM) = 1 000 kg; 1kg =  $10^{-3}$  TM

Densidad de la calcita pura =  $2.5 \text{ kg/m}^3$ ; Caliza no pura en Calcita (1.5 – 2.9).

**Datos de partida:**

Area de la cuenca:  $1\,202 \text{ km}^2$  (Barros y León, 1997)

Línea de Costa: 40 km (Barros y León, 1997)

Precipitación media anual: 1 398 mm (Barros y León, 1997)

Temperatura media anual:  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (Academia de Ciencias, 1988)

Extracciones por explotación del acuífero (Jiménez, 1997):

Riego:  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$

Acueducto:  $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$

Extracción Total Anual:  $6.7 \text{ m}^3/\text{s} = 6.7 \text{ m}^3 \times 3110400 \text{ año} = 2.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}$

**Cálculo de la recarga y la denudación química en la zona de alimentación.**

**a) Recarga del acuífero en la zona de alimentación**

Con el objetivo de determinar la magnitud de la denudación química en la zona de recarga del área de estudio (en la Cuenca Sur de La Habana), se escogieron los datos hidrogeológicos de las subcuencas Artemisa, Alquizar y Güira-Quivicán, con una superficie de  $1\,202 \text{ km}^2$ , aunque la información hidroquímica se tomó de los resultados obtenidos en el sector hidrogeológico Güira Quivicán objeto de estudio de este trabajo. Además, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones básicas:

- En todo el territorio que abarca el área seleccionada para la determinación de la denudación química, al igual que la región referida en la Península de Yucatán (Back y Hanshaw, 1980), no existe escurrimiento superficial y prácticamente toda la descarga del acuífero se produce en la zona cenagosa contigua al litoral.
- En la zona de recarga las aguas de las precipitaciones se infiltran en el acuífero y disuelven las calizas hasta alcanzar la saturación respecto a la calcita.

El cálculo de la recarga media anual (RMA=escurrimiento) se realiza a partir de métodos hidroquímicos, según lo reportado por Appelo y Postma, (1993), dividiendo entre el factor de concentración del ion  $\text{Cl}^-$  (4.54, calculado por MODELAGUA, Fagundo-Sierra, *et al.*, 2001) la precipitación media anual (PMA) en la cuenca (Barros y León, 1997), que es de 1 398 mm, obteniéndose un valor de  $\text{RMA} = 305 \text{ mm/año} = 0.305 \text{ m/año}$ .

Tomando en cuenta el área de la cuenca, se calcula el valor de la Recarga Total Media Anual (RTMA) del acuífero:

$$\text{RTMA} = (1\,202 \times 10^6 \text{ m}^2)(0.305 \text{ m/año}) = 3.66 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}$$

**b) Denudación química en la zona de alimentación**

- Por el hecho de no existir escurrimiento superficial, la magnitud de la descarga del sistema acuífero puede ser calculada a partir de la recarga del mismo en forma similar a como se hizo en Yucatán (Back, *et al.*, 1979).
- Para el cálculo de la cantidad de calcita disuelta se utiliza un modelo simple, el cual tiene su fundamento en que las aguas que se infiltran en el macizo carbonatado alcanzan en su recorrido la saturación en calcita.

La cantidad de calcita disuelta en el sistema de acuíferos fue calculada mediante el sistema informático MODELAGUA (Fagundo-Sierra, *et al.*, 2001), basado en un modelo de balance de masas y mezcla de aguas que utiliza al cloruro como ion conservativo para el cálculo del factor de concentración por efecto de la evapotranspiración. Se utiliza la composición química de la muestra tomada en el pozo Rancherita a 20 m, representativa de la zona de alimentación del acuífero. El resultado obtenido fue de  $2.23 \text{ mMol/L}$  de  $\text{CaCO}_3$ , o lo que es igual  $2.23 \text{ Mol/m}^3$ .

Esto significa que cada  $\text{m}^3$  de agua subterránea que se mueve en la zona de alimentación transporta 2.23 Moles de  $\text{CaCO}_3$ , por lo que multiplicando esta cifra por la RTMA, obtenemos la denudación química (Dq), que será igual a:

$$\begin{aligned} Dq &= (\text{RTMA}) \times (2.23 \text{ Mol}/\text{m}^3 \text{ de } \text{CaCO}_3) \\ &= 3.66 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año} \times 2.23 \text{ Mol}/\text{m}^3 = 8.16 \times 10^8 \text{ Mol } (\text{CaCO}_3)/\text{año} \end{aligned}$$

Dividiendo este valor por la superficie de la cuenca ( $1\,202 \text{ km}^2$ ), se obtiene la denudación química por cada  $\text{km}^2$  ( **$6.79 \times 10^5 \text{ Mol } (\text{CaCO}_3)/ \text{año km}^2$** ). Teniendo en cuenta que una tonelada métrica (TM) contiene 1 000 Kg y que un mol de calcita representa  $10^{-1}$  Kg, se tiene que la denudación química en la zona de alimentación será de  **$67.9 \text{ TM}/ \text{año km}^2$** . Este valor es mayor que el calculado por Back, *et. al.*, (1979) en la Península de Yucatán ( **$37.5 \text{ TM}/ \text{año km}^2$** ).

Como la densidad de la calcita pura es igual a  $2.5 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ , la denudación química (Dq), expresada en  $\text{m}^3$  sería igual a  **$27.16 \text{ m}^3/ \text{año km}^2$** , lo que significa que  **$27.16 \text{ m}^3$**  de calcita son removidos cada año por cada  $\text{km}^2$ . Cálculo de la descarga y la denudación química en la zona de emisión.

### ***Cálculo de la descarga y la denudación química en la zona de emisión.***

#### **a) Descarga del acuífero.**

Para calcular la descarga del acuífero en la zona de emisión es necesario hacer un balance entre el agua que entra al acuífero (RTMA) y la que se extrae antes de llegar a la zona de emisión del mismo por la actividad humana (EXPL). Restando el agua extraída en la cuenca para el consumo de la población, que según Jiménez, *et al.*, (1997) es de  $6.7 \text{ m}^3/\text{s}$  ( **$2.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}$** ), al valor de la Recarga Total Media Anual (RTMA =  **$3.66 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}$** ), se obtiene la magnitud de la Descarga Media Anual (DMA) del acuífero ( $1.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}$ ).

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{RTMA} - \text{EXPL} = (3.66 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}) - (2.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año}) \\ \text{DMA} &= 1.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año} \end{aligned}$$

#### **b) Denudación química en la zona de emisión**

Las aguas subterráneas en su recorrido a través del acuífero, debería alcanzar la zona de emisión con una cantidad de calcita disuelta propia del estado de equilibrio. Sin embargo, en la zona de dispersión de la mezcla una cantidad adicional de calcita se incorpora en virtud de los procesos de interacción mezcla-roca carbonatada. Con el objetivo de estimar la cantidad de calcita que es disuelta en esta zona fue seleccionado el pozo Sotolongo Díaz a 50 m (Tab. 5.14), donde el porcentaje de agua de mar en la mezcla en el período de estudio varió entre 26.2 y 69.9 %.

No se tomaron los datos del pozo Alvaro Barba, ya que por efecto del humedal se produce un incremento notable de  $\text{Ca}^{2+}$ , debido fundamentalmente al proceso de intercambio iónico inverso, a pesar de que posiblemente, previo a este proceso se debe producir una disolución de calcita a expensas del dióxido de carbono y los ácidos húmicos y fúlvicos aportados por la materia orgánica del humedal. Tampoco se tomaron los datos del pozo Cajío por encontrarse muy próximo al mar y predominar en sus aguas los procesos de precipitación de calcita. Los restantes pozos no disponían de muestras representativas de todo el intervalo de tiempo estudiado.

Como puede observarse en la tabla 1, la cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$  disuelto, equivalente a igual cantidad de calcita es del orden de  $1 \text{ mMol}/\text{L}$  ( $1 \text{ Mol}/\text{m}^3$ ), magnitud similar a la estimada por Back, *et. al.*, (1979), en la zona de dispersión de la mezcla del acuífero estudiado por ellos en la Península de Yucatán.

**Tabla 1.** Cantidad de calcio disuelto (mmol/l) en el pozo Sotolongo Díaz a 50 metros de profundidad durante los muestreos efectuados entre 1997 y 1998.

No.	*Sotolongo (50 m)		
	Muestreo	% mezcla	Ca <sup>2+</sup> disuelto
1	27/02/97	61.7	2.657
2	28/03/97	59.9	0.563
3	25/04/97	69.9	0.245
4	29/05/97	69.9	0.895
5	27/06/97	47.2	1.427
6	29/09/97	53.2	2.181
7	30/10/97	26.2	2.429
8	22/12/97	35.0	0.112
9	30/01/98	40.8	0.109
10	27/02/98	28.0	1.573
11	28/03/98	45.9	2.204
12	15/07/98	39.0	1.665
Media			1.003*

\*Media de las 12 muestras mensuales considerando solo las muestras en que hubo disolución de calcita. Se tomaron en consideración solamente las cantidades de Ca<sup>2+</sup> correspondientes a la reacción de disolución de calcita, calculadas por el sistema informático MODELAGUA (Fagundo-Sierra *et. al.*, 2001) y no la de otros procesos que también aportan calcio, tales como: la dolomitización y el intercambio iónico inverso.

Comparando estos resultados con los obtenidos por experimentos de disolución de calcita en el laboratorio (González, *et al.*, 1996), puede inferirse que la cantidad de calcita disuelta en la zona de emisión del acuífero, tanto en el sector hidrogeológico Güira-Quivicán, como en el acuífero yucateca, es inferior a la obtenida en los experimentos de laboratorio en condiciones de sistema abierto respecto al CO<sub>2</sub> y de mezcla con agua de mar, para una proporción de 10 % de agua de mar en la mezcla. El valor mucho mayor de CaCO<sub>3</sub> disuelto en el laboratorio, indica que el flujo de CO<sub>2</sub> utilizado en los experimentos era más alto que el suministrado por la materia orgánica en condiciones naturales. No obstante, dichos experimentos pusieron de manifiesto que la dureza del agua aumentaba con el incremento del contenido de NaCl en la solución, lo que también ocurre en el acuífero hasta un determinado porcentaje de agua de mar en la mezcla.

El valor de la denudación química en la zona de dispersión de la mezcla es, por tanto:

$$\begin{aligned} Dq &= DMA \times 1 \text{ Mol}(\text{CaCO}_3)/\text{m}^3 \\ &= 1.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{año} \times 1 \text{ Mol}(\text{CaCO}_3)/\text{m}^3 \\ Dq &= 1.58 \times 10^8 \text{ Mol}(\text{CaCO}_3)/\text{año} \end{aligned}$$

Dividiendo esta magnitud de la denudación química por el área de la cuenca (1 202 km<sup>2</sup>), se obtiene:

$$Dq/\text{km}^2 = 1.31 \times 10^5 \text{ Mol}(\text{CaCO}_3)/\text{año km}^2.$$

Esto significa **13.1 TM/año km<sup>2</sup>**, que resultan un incremento a las **67.9 TM/año km<sup>2</sup>**, calculadas para zona de recarga, dando un total de **81.0 TM/año km<sup>2</sup>**, lo que equivale a **32.4 m<sup>3</sup>** de caliza al año. Este estimado muestra la gran corrosión química a que está sometido este acuífero producto de la *intrusión marina*.

## CONCLUSIONES

El cálculo de la denudación química en el Sector Güira-Quivicán de la Cuenca Sur de la Habana, muestra un incremento de **13.1 TM/año km<sup>2</sup>**, producto de la intrusión marina que unidas a las **67.9 TM/año km<sup>2</sup>**, calculadas para zona de recarga, dan un total de **81.0 TM/año km<sup>2</sup>**, equivalente a **32.4 m<sup>3</sup>** de caliza al año, poniendo al relieve la gran corrosión química a que está sometida el área de estudio por la acción de la mezcla agua dulce-agua de mar lo cual concuerda con los resultados obtenidos en experimentos de mezcla realizados en el laboratorio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ACADEMIA DE CIENCIAS (1988). Atlas Nacional de Cuba.
2. ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA (1988). Mapa Geológico de Cuba. Escala 1: 250 000.
3. ÁLVAREZ E. (1998). Sistemas de computación para la caracterización hidrogeoquímica y el control de la calidad de las aguas naturales en acuíferos y cuencas hidrográficas. En opción al Grado de Dr. en Ciencias Geográficas. Instituto de Geografía Tropical (CITMA)
4. APHA, AWWA, WPCF. (1989). Standars methods for the Examination of Water and Waste Water.
5. APPELO A.J. y D. POSTMA. (1993). Geochemistry, Groundwater and Pollution. A.A. Balkema Publish. Rotterdam, Brookfield, 536 pp.
6. BACK W. y B.B HANSHAW. (1980). Comparison of chemical hydrology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan. Journal of Hydrology, Vol. 10, No. 4, pp 330-368.
7. BACK W.; B.B. HANSHAW; T.E. PYLE, L.N. PLUMMER, y A.A WEILIE. (1979). Geochemical Significance of groundwater discharge and carbonate solution to formation of caleta Xel Ha, Mexico. Water Resources Research. Vo. 15 No. 6, 1521-1535.
8. BARROS O, y A. LEÓN. (1997). Recarga y acuosidad en cuencas de llanuras. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Bilbao, 53-59.
9. FAGUNDO J.J. VALDÉS, J. RODRÍGUEZ, J.M. PAJÓN, A. DE LA CRUZ, A. GARCÍA, M. PULINA. (1986). Estudio preliminar sobre el proceso de denudación cársica en el polígono cubano-polaco del Pan de Guajaibón. Voluntad Hidráulica, 70/71: 11-15.
10. FAGUNDO-SIERRA J., J, J.R. FAGUNDO, P. GONZÁLEZ, M. SUÁREZ, C. MELEÁN. CENTERVISA. MODELAGUA, software para la determinación del origen de la composición química de las aguas minerales. Registro 08280-08280 (CENDA).
11. FORD D. y P. WILLIAMS. (1989). Karst Geomorphology and Hydrogeology. Ed. Unwin Hyman Inc. , London, 601 Págs.
12. GAMS I. (1972) Efect of runoff on corrosion intensity in the northwest Dinaric karst. Trans. Cave Res. Gp. GB. 14 (2): 78-83.
13. GONZÁLEZ P. (1997). Estudio a nivel de laboratorio de los procesos de interacción agua-roca. Tesis en opción al grado de Maestro en Ciencias del Agua. Centro Nacional de Investigaciones Científicas.
14. GONZÁLEZ P.; V. FERRERA; G. BENÍTEZ; J.R. FAGUNDO Y L. SÁNCHEZ. (1996). Estudios experimentales de disolución de roca carbonatada en condiciones de mezcla agua dulce-agua de mar. En: Contribuciones a la Hidrogeología y Medio Ambiente en Cuba. Eds. J.R. Fagundo, J.M. García, A. Alvarez-Nodarse, I. Morell, Universidad de Castellón, 357-366.
15. HANSHAW B.B y W BACK. (1980). Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution. Geology, 8: 222-224.
16. JIMÉNEZ S., E.R. SANTIESTEBAN Y J.A. ARENCIBIA. (1997). Evolución de la intrusión marina en el acuífero de la costera Sur de La Habana. En: Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eds. D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín, I. Antiguada, Bilbao, 115-123.



17. LOPEZ J.A Y J. MA MENA. (1988). Aspectos metodológicos en el estudio de la Intrusión Marina. Documento Básico. Eds.
18. MAIRE R. (1981). Karst and hydrogeology synthesis. Spelunca, Supp. No 3: 23-30.
19. MARKOWICZ M. y M. PULINA. (1979). Ilosiowa. Polmicroanaliza chemiczna wod W. Obzarach Krasu Weglanowego (semi- quantitative chemical analyses of the waters in the carboniferous Karst areas). Prace Naukowa. Univ. Slaski Kalowice.
20. PULINA M. (1974). Chemical denudation on the carbonate karst areas. Prace Geogr. PAN, 105 Págs., Ossolineum, Wroclaw, 1974.
21. PULINA M., J.R. FAGUNDO, J.J. VALDÉS, J. RODRÍGUEZ, A. KOZIK, J. LESZKIEWIZ, P. GLOWACKI, J. PAJÓN, A. DE LA CRUZ, A. GARCÍA.(1984). The Dynamic of the Contemporary Karstic Processes in the Tropical Area of Cuba. Preliminary report of the field investigations performed by the Expedition Guajaibon' 84 in the winter season 1984. Univ. Slaski, Sosnowiec (Polonia), 42 Pags.
22. RODRÍGUEZ J. E Y J.R. FAGUNDO. (1995). Hydrology and dynamics of tropical karst processes in Cuba. Studia Carsologica (Brno) 6: 42- 54,
23. RODRÍGUEZ J.E., J.R. FAGUNDO, F. CUTIÉ, C. CRUZ, E. FRANCO. (1989). Hidrología cársica del macizo del Pan de Guajaibón, Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba, durante el año hidrológico Noviembre de 1984-Octubre de 1985. Monografía. Ed. Academia, La Habana, 60 Págs.