



## APLICACIONES DE LA CINÉTICA EN LA HIDROGEOLOGÍA Y EL MEDIO AMBIENTE

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

<sup>1</sup>Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional. MINAP ([juanrfag@infomed.sld.cu](mailto:juanrfag@infomed.sld.cu))

<sup>2</sup>Centro de Estudios de Medio Ambiente. Universidad de La Habana

### RESUMEN

*En un trabajo anterior se trató sobre las aplicaciones termodinámicas en la Hidrogeología, donde se abordaron los fundamentos termodinámicos del equilibrio químico y se ejemplificó su aplicación en problemas relacionados con la misma (Fagundo et al., 2003). En el presente trabajo se discuten los principios de la cinética y se muestra, mediante experimentos en el laboratorio y en el campo, el proceso de adquisición de la composición química de las aguas en su interacción a través del tiempo con el medio acuífero, así como la aplicación de estos principios para evaluar el modo en que el agua adquiere su calidad en los mismos.*

**Palabras claves:** modelos hidrogeoquímicos, cinética, acuíferos cársicos.

### ABSTRACT

*In a previous paper it was dealt with the thermodynamic applications in hydrogeology, and the thermodynamic fundamentals of the chemical equilibrium were tackled. Its application was also exemplified in problems related to hydrogeology (Fagundo et al., 2003). In this paper the principles of kinetic are discussed, and by means of laboratory and field experiments, it is shown the acquisition process of the chemical composition of the waters in its interaction throughout the time with the aquifers. Also the application of these principles to assess the way in which the water acquires its quality in them is also studied.*

**Keywords:** Hydrogeochemical models, kinetics, karstic aquifers.

### INTRODUCCIÓN

El modo en que las aguas naturales adquieren su composición está controlada por principios termodinámicos del equilibrio químico y de la cinética. Al cabo del tiempo, en su trayectoria subterránea, el control lo ejerce en la cinética química. En muchos trabajos relacionados con la calidad de las aguas naturales, no se considera el papel que juega el factor tiempo en el proceso de disolución de los minerales, limitándose solo a estudiar dicha calidad en condiciones de equilibrio. Sin embargo, el tiempo de reacción junto a la temperatura y el contenido de CO<sub>2</sub>, son los tres principales elementos que determinan el proceso de adquisición de la composición química a través de las distintas fases presentes: gas, líquido y sólido. En las condiciones naturales, en un momento dado, el contenido de CO<sub>2</sub> libre y de CO<sub>2</sub> combinado es el resultado de la acción del tiempo, así como de las condiciones geológicas anteriores (Fagundo, 1996).

Para ilustrar el proceso mediante el cual el agua adquiere su composición es conveniente realizar experimentos cinéticos en el laboratorio, utilizando minerales solubles tales como halita, yeso o



carbonatos (calcita o dolomita). En el caso de los carbonatos la disolución, en presencia de  $\text{CO}_2$  tiene lugar en pocos minutos, no siendo así en el caso de minerales del tipo aluminosilicato, donde en condiciones normales, las reacciones alcanzan el equilibrio al cabo de semanas y años.

El proceso de disolución de los carbonatos por un agua que contiene un cierto contenido de  $\text{CO}_2$  ha sido estudiado, desde el punto de vista cinético, por diferentes autores. Entre los trabajos publicados a partir de la década del 70, se destacan los de Roques y Ek (1973), Berner y Morse (1974), Sjöberg y Rickard (1984), Dreybrodt (1992), así como los del colectivo cubano (Fagundo et. al., 1996; Alvarez et al., 1996; González et al., 1997).

En este trabajo se presenta un resumen de los resultados experimentales, obtenidos por el colectivo, con el objetivo de simular en el de laboratorio los procesos de interacción agua roca que ocurren en los acuíferos carbonatados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la simulación en el laboratorio de los procesos de interacción agua – roca carbonatada se empleó dos tipos de reactores:

1. Reactor tipo batch de teflón, con una capacidad de 3,5 litros, cubierto con una tapa, también de teflón, con huecos para insertar el agitador, los electrodos y el tubo dispersor del gas. Se realizan dos tipos de experimentos: los denominados del tipo REL (se sigue la reacción a través de toma de muestras para las determinaciones físico-químicas) y los denominados del tipo CINET (la reacción es seguida a través de las mediciones directas de los parámetros físico-químicos (Fagundo et al., 1996; Alvarez et al., 1996; González, 1997).
2. Reactor tipo embudo frita con capacidad de dos litros y porosidad No. 1, por cuyos poros difunde el  $\text{CO}_2$ . Esto permite una mayor difusión del gas al sistema y una mayor homogeneidad, que se produce por el burbujeo del gas en el agua.

Los experimentos se realizaron de dos formas con respecto al  $\text{CO}_2$ : en condiciones de sistema abierto (burbujeando el gas todo el tiempo, dejado abierto el manómetro) y en condiciones de sistema cerrado (burbujeando un tiempo limitado, cerrando luego el manómetro).

Las rocas utilizadas en los experimentos (calizas y dolomías), fueron tamizadas (80 y 200 mesh) y caracterizadas por difracción de rayos X. El  $\text{CO}_2$  utilizado en todos los experimentos, fue de un 99,99 % de pureza envasado en cilindro a una presión de 150 atm ( $1.52 \cdot 10^7$  Pa).

Las mediciones de los diferentes parámetros físico-químicos se realizaron con un pHmetro MPH-4B CNIC y un conductímetro ECCA-2 CNIC. Los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  se determinaron por métodos volumétricos, siguiendo las recomendaciones del “*Standard Methods for the Examination of Wastewater*” (APHA; AWWA; WPCF; 1992).

Los datos hidroquímicos fueron procesados mediante el sistema informático SIMUCIN (Alvarez y Fagundo, 1995), basado en el modelo cinético experimental.

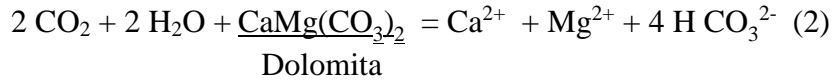
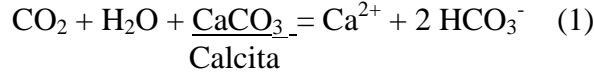
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Fundamentos de los experimentos cinéticos de la disolución de los carbonatos

En las investigaciones realizadas en el laboratorio por el colectivo cubano (Fagundo et. al., 1996; Alvarez et al., 1996; González et al., 1997), con el objetivo de esclarecer el modo en que las aguas



naturales adquiere su composición química, se simuló el proceso completo de disolución de la calcita y la dolomita, tanto en condiciones de sistema abierto como cerrado con respecto al CO<sub>2</sub>:



Este proceso puede ser expresado mediante una ecuación cinética deducida a partir de:

$$\frac{dC}{dt} = k (C_{eq} - C) \quad (3), \text{ donde: } \frac{dC}{dt} \text{ es la velocidad de reacción; } k: \text{ la constante de velocidad;}$$

$C_{eq}$ : las concentraciones de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> (calizas dolomitizadas y dolomitas), y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el equilibrio químico; y C es la concentración de esos iones en el tiempo t. Despejando C e integrando la expresión (3), se obtiene la ecuación que expresa la variación de la concentración iónica en el tiempo (Fig. 1):

$$C = C_{eq} (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

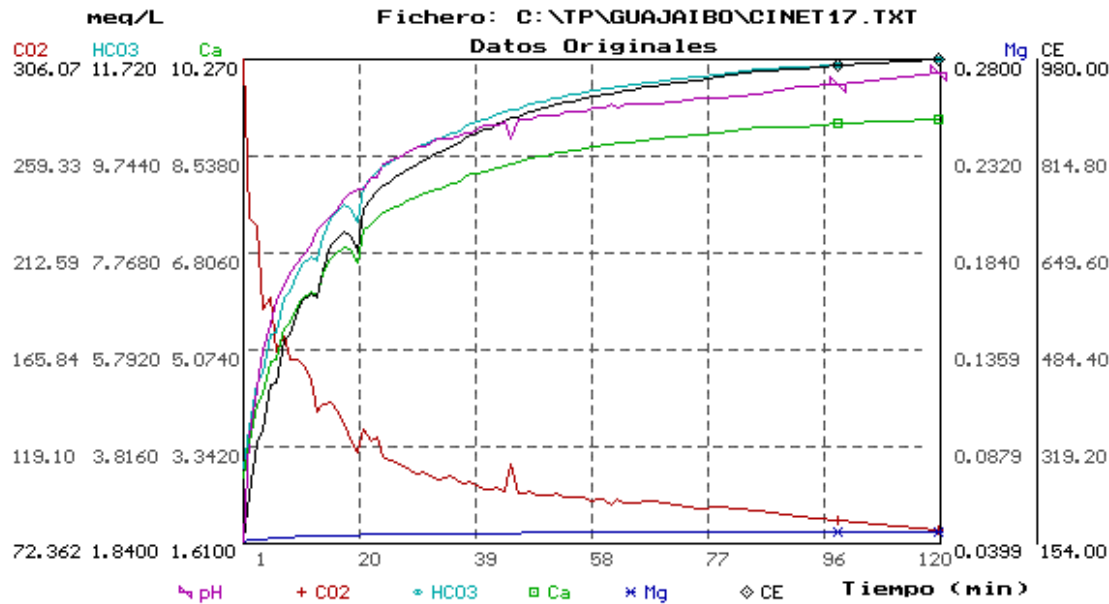


Figura 1: Variación en el tiempo de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>, del pH y la conductividad eléctrica del fichero Cinet17.

En los trabajos de simulación del proceso de interacción agua-roca en el laboratorio, en las condiciones experimentales realizadas, quedó demostrado que esta expresión es en realidad de pseudo primer orden (Fagundo, 1996; Alvarez et al, 1996):

$$C = C_{eq} (1 - e^{-kt^n}) \quad (4 a)$$

donde n, es un coeficiente experimental que toma valores entre 0 y 1 (Fig. 2).

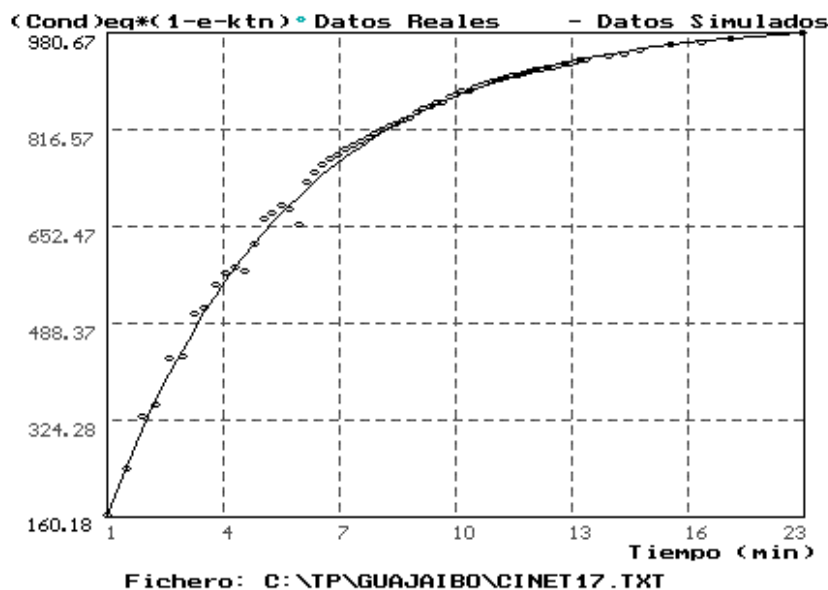


Figura 2: Resultados comparativos entre los valores reales y los obtenidos por simulación para el fichero Cinet17, con  $n=0.67$

En la figura 3 se ilustra, mediante el diagrama de Tillman Trombe, el comportamiento de un experimento de interacción agua – roca carbonatada, cuya tendencia es alcanzar el equilibrio al final de la reacción. En dependencia del contenido de  $\text{CO}_2$  disponible, el agua adquiere en el mismo mayor o menor dureza.

### Evaluación del efecto de los factores que controlan la disolución de los carbonatos mediante experimentos cinéticos

Con el objetivo de evaluar el papel que ejercen los diferentes factores que determinan la cinética de disolución de los carbonatos (temperatura, velocidad de agitación, contenido y forma de suministro del  $\text{CO}_2$ , cantidad disponible y tipo de roca), se realizaron varios experimentos cinéticos (Tabla 1). Como indicador de eficiencia del proceso, se tomó el incremento de dureza en el agua del reactor al final de la reacción ( $\Delta\text{CaCO}_3$ ), el cual es proporcional a la diferencia de conductividad eléctrica final ( $\text{CE}_f$ ). Los resultados fueron los siguientes:

1. Aunque de poca magnitud, se apreció como tendencia, un mayor contenido de la dureza al disminuir la temperatura. En los experimentos CINET 2 y 16, realizados a diferentes temperaturas en condiciones similares, se aprecia una disminución de 128 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  disuelto al aumentar 3 °C la temperatura del agua. Este efecto, que está regido por la ley de Arrhenius, es más significativo e las aguas termales procedente del drenaje profundo de los acuíferos.
2. La dureza del agua al final de la reacción es mucho mayor cuando la de la velocidad de agitación es mayor debido a que se garantiza una mejor difusión del  $\text{CO}_2$  (experimentos CINET 6 y 12 realizados con velocidades de 500 y 0 rpm respectivamente, manteniendo en forma similar los restantes parámetros). Con una agitación de 500 rpm se alcanza 200 mg/l más de  $\text{CaCO}_3$  disuelto que sin agitación.
3. Las mayores concentraciones de carbonato de calcio disuelto se obtienen utilizando mayores contenidos de  $\text{CO}_2$  (experimentos CINET 2, 16, 6 y 12).



4. La dureza que adquiere el agua se incrementa a medida que la cantidad de roca disponible en el reactor es mayor, tanto en condiciones de sistema abierto como cerrado respecto al CO<sub>2</sub> (experimentos CINET 2 y 14, y CINET 3 y 18 respectivamente).
5. Las calizas son más solubles que las dolomías en las condiciones estudiadas (experimentos CINET 6 y 7).
6. La composición química de las aguas resultantes de los experimentos cinéticos es similar a las de los acuíferos cársicos (aguas bicarbonatadas cálcicas).

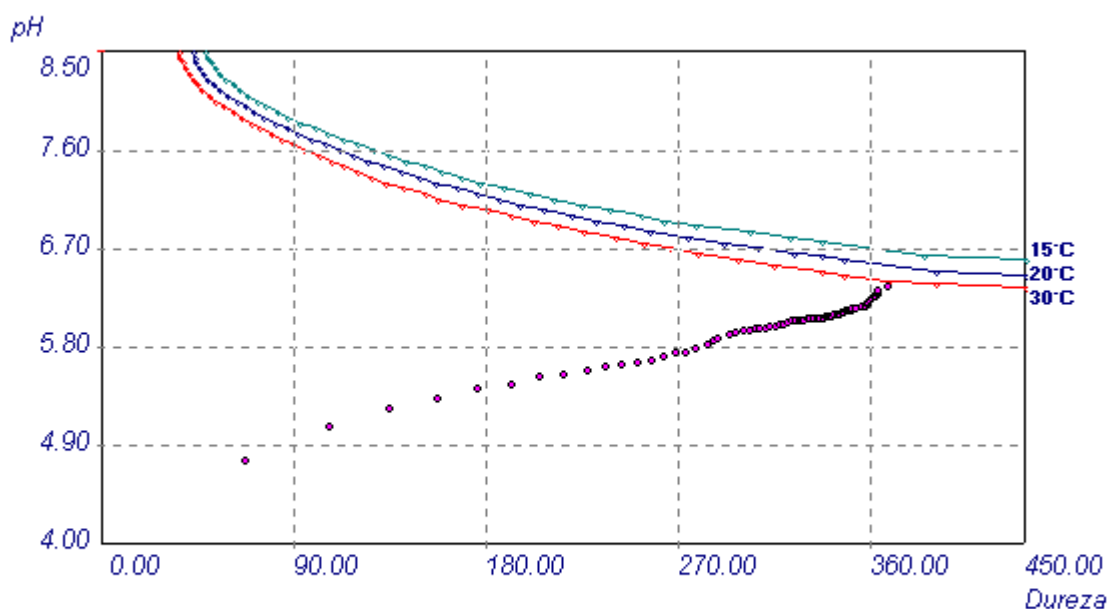


Figura 3. Diagrama de Tillman Trombe donde se aprecia la variación de la concentración de CaCO<sub>3</sub> hasta el establecimiento del equilibrio químico (experimento CINET18).

Las magnitudes de pCO<sub>2</sub> se expresan en atmósferas con el objetivo de que resultados puedan compararse con reportados por otros investigadores, ya que en la literatura especializada se utiliza dichas unidades. Para cualquier otra consideración se debe tener en cuenta que 1 atm. = 1.01325 · 10<sup>5</sup> Pa.

### Concentraciones de carbonato de calcio en acuíferos cársicos, comparación con los resultados de los experimentos cinéticos

En la tabla 2 se muestran las concentraciones en mg/L de CaCO<sub>3</sub> disuelto de algunas fuentes cársicas (pozos y manantiales) en el país, con el objetivo de comparar sus magnitudes con las alcanzadas en los experimentos cinéticos que aparece en la tabla 1.



Tabla 1. Condiciones experimentales de la simulación química en el laboratorio de los procesos de interacción agua-roca.

Experimento	Roca	Sistema con respecto al CO <sub>2</sub>	Muestra (mg/L)	Vag (rpm)	T (°C)	Flujo (m <sup>3</sup> /s) *10 <sup>7</sup>	Dosis CO <sub>2</sub> (min)	pCO <sub>2</sub> (atm.)	CaCO <sub>3</sub> (mg/l)
CINET 2	1	Abierto	17.5	500	23.0	7.86	Cont.	10 <sup>-1.4</sup>	784
CINET 16	1	Abierto	17.5	500	26.0	7.86	Cont.	10 <sup>-1.1</sup>	656
CINET 14	1	Abierto	7	500	26.0	7.86	Cont.	10 <sup>-1.4</sup>	634
CINET 9	4	Abierto	7	500	26.5	7.86	Cont.	10 <sup>-0.2</sup>	625
CINET 15	1	Abierto	7	500	25.0	7.86	Cont.	10 <sup>-1.2</sup>	548
CINET 6	1	Cerrado	7	500	25.5	7.86	10	10 <sup>-1.5</sup>	381
CINET 12	1	Cerrado	7	0	26.0	7.86	10	10 <sup>-1.2</sup>	180
CINET 18	1	Cerrado	7	500	29.0	7.86	20	10 <sup>-1.3</sup>	382
CINET 19	1	Cerrado	7	500	28.0	7.86	5	10 <sup>-1.2</sup>	376
CINET 3	1	Cerrado	17.5	500	24.0	7.86	20	10 <sup>-1.8</sup>	424
CINET 7	2	Cerrado	7	500	26.0	7.86	10	10 <sup>-0.8</sup>	100

1. Caliza del CNIC (Fm. Jaimanita, Mioceno); 2. Dolomita de los Bajos Tatras; 4. Caliza Guajaibón (Cretácico).

Como puede apreciarse en la tabla 2, el contenido de CaCO<sub>3</sub> en estas aguas (167-321 mg/L), es algo menor que el obtenido en los experimentos de disolución de carbonato en condiciones de sistema cerrado respecto al CO<sub>2</sub>, utilizando 7 g de roca y una agitación de 500 rpm (376 - 382 mg/L). Las mayores concentraciones obtenidas en el laboratorio pudieran deberse a que se utilizó una dosis de CO<sub>2</sub> inicial y una velocidad de agitación algo superior a la que se produce en los flujos naturales, cuestión esta a tomar en consideración en futuros experimentos de simulación a nivel de laboratorio, con el objetivo de lograr resultados más semejantes.

#### **Evaluación del efecto de vertido de residuales orgánicos en los terrenos cársicos costeros mediante experimentos cinéticos, comparación con un sistema real**

La acción del hombre en los terrenos carbonatados costeros puede producir, por vertido de residuales agroindustriales con altos contenidos de CO<sub>2</sub>, un deterioro adicional de la calidad del agua, (alto contenido de cloruros y mayor dureza) y una mayor corrosión química del terreno (Fagundo y González, 1999), ya que en ese medio, las aguas actuarán controladas por tres efectos, además del de la interacción agua-roca en presencia de un determinado contenido de CO<sub>2</sub> (disolución en condiciones de sistema cerrado o mixto). Estos son el denominado efecto salino (o de fuerza iónica), el efecto de mezcla de aguas y el efecto de la biodegradación de la materia orgánica, (disolución en condiciones de sistema abierto respecto al CO<sub>2</sub>). Si bien el efecto salino y el de pCO<sub>2</sub> incrementan la solubilidad de los carbonatos, el de mezcla de aguas puede originar disolución o precipitación en dependencia de las características de las aguas que se mezcla (Fagundo, 1996).

El efecto de un residual orgánico vertido en un acuífero cársico puede evaluarse mediante experimentos de laboratorio de interacción agua - roca (Fagundo et al, 1996 a). Este efecto puede



simularse en el laboratorio haciendo reaccionar, en un reactor, CO<sub>2</sub> de manera continua con calizas procedentes del acuífero (condiciones de sistema abierto).

Tabla 2. Dureza de algunas fuentes cársicas tomadas como referencia para su comparación con los experimentos cinéticos de interacción agua roca (Tab. 1).

Fuente	N	Tipo de fuente	Ubicación	CaCO <sub>3</sub> (mg/L)
Surgencia Ancón	38	Surgenica cársica zona de montaña	Sierra del Rosario	167
Manantial Mil Cumbres	18	Manantial zona de montaña	Sierra del Rosario	237
Manantial Bataldó	30	Manantial zona de montaña	Meseta del Guaso	184
Pozo Catalina de Güines	9	Pozo en llanura cársica cerrada	Cuenca Jaruco	240
Pozo El Gato	7	Pozo en llanura cársica cerrada	Cuenca Jaruco	321
Pozos Aguacate	23	Pozo en llanura cársica cerrada	Cuenca Aguacate	263
Pozo Padirac	10	Pozo en llanura cársica costera	Cuenca Sur de La Habana	277
Pozo Rancherita	4	Pozo en llanura cársica costera	Cuenca Sur de La Habana	321

N: Número de datos.

Comparando lo resultados de los experimentos CINET 6, 15 y 9 (Tabla 1), se demuestra que las concentraciones de CaCO<sub>3</sub> alcanzadas en esos experimentos crecen casi el doble, desde 381 hasta 605 mg/l, al aumentar la presión de CO<sub>2</sub> desde 10<sup>-1.5</sup> (CINET 6) hasta 10<sup>-0.2</sup> atm (CINET 9). Con una pCO<sub>2</sub> intermedia (10<sup>-1.2</sup> atm), también se obtiene una dureza intermedia (518 mg/l).

Mediante experimentos de laboratorio en condiciones de sistema cerrado respecto al CO<sub>2</sub> se puede estimar que, sólo por efecto salino o de fuerza iónica, se produce también casi el doble de la disolución CaCO<sub>3</sub> en el agua al variar el porcentaje de mezcla desde 0 a 10 %; esto es, de 240 mg/l a 402 mg/l (Tabla. 3).

Tabla 3. Simulación química en el laboratorio de los procesos de interacción agua-roca (carbonato) en condiciones de sistema cerrado respecto al CO<sub>2</sub> y de mezcla con agua de mar.

Experimento	% Mezcla	ΔCaCO <sub>3</sub> (mg/l)	CaCO <sub>3</sub> (mg/l)
CINET M	0	0	246
CINET T	0.5	190	436
CINET N	1	190	436
CINET S	2	121	367
CINET R	3	148	394
CINET P	10	156	402

Sin embargo, cuando se combinan el efecto salino con el de adición de CO<sub>2</sub>, se obtienen entonces elevadas concentraciones de carbonato de calcio disuelto. Así, en condiciones de sistema abierto respecto al CO<sub>2</sub>, simulando el efecto del vertido de un residual orgánico biodegradable, se puede lograr



un aumento en  $\text{CaCO}_3$  disuelto de 3 o 2 veces, en dependencia del contenido de dióxido de carbono disponible. En la tabla 3 se muestra que con un 10 % de mezcla con agua de mar, este incremento con respecto al agua sin mezclar, en condiciones de sistema cerrado respecto al  $\text{CO}_2$  es casi el doble (variación de 700 a 1300 mg/l) y con respecto al experimento de la tabla 4, realizado en condiciones de sistema abierto, es 5 veces mayor (variación de 246 a 1300 mg/l).

Tabla 4. Simulación química en el laboratorio de los procesos de interacción agua-roca (carbonato) en condiciones de sistema abierto respecto al  $\text{CO}_2$  y de mezcla con agua de mar.

Experimento	% Mezcla	$\Delta\text{CaCO}_3$ (mg/l)	$\text{CaCO}_3$ (mg/l)
CINET 1 Mezcla	0	0	700
CINET2 Mezcla	2	150	850
CINET 3 Mezcla	6	275	975
CINET 4 Mezcla	10	350	1050
CINET 5 Mezcla	15	450	1150
CINET 6 Mezcla	20	600	1300

Estos experimentos demuestran que el vertido de residuales orgánicos en un acuífero cársico costero puede generar una gran carsificación, y por ende, un deterioro de la calidad del agua (en términos de mayor dureza y contenido de cloruros), así como una rápida transformación del relieve. Esto explica algunos desastres ocurridos en terrenos cársicos donde se han inyectado residuales azucareros al acuífero a través de ponores (sumideros), tal como sucedió en la Ronera Santa Cruz y en algunos sitios de la provincia de Matanzas. Estos resultados llaman a reflexionar sobre la necesidad de tratar adecuadamente estos residuales antes de disponerlos en el medio cársico.

### **Concentraciones de $\text{CaCO}_3$ adquirida por las aguas en un acuífero costero afectado por la intrusión marina**

Para comparar la dureza adquirida por el agua en los experimentos cinéticos, con la dureza que poseen las aguas de los acuíferos cársicos litorales, se toma en consideración las magnitudes delta calcio o delta dureza ( $\Delta \text{Ca}^{2+}$ ,  $\Delta \text{CaCO}_3$ ). Estas magnitudes representan el exceso o déficit del ion o la dureza respectivamente, como resultado del proceso de mezcla agua dulce - agua de mar en el acuífero (Fagundo et al., 2002). En la tabla 6, se muestran los resultados del cálculo de estas magnitudes para el pozo Sotolongo Díaz a los 50 m de profundidad (perteneciente a la Red de Observación del IRH), en el sector Güira - Quivicán de la Cuenca Sur de La Habana (Fagundo et al., 2002). Fue seleccionado este pozo, ya que en él, esa profundidad, se produce un proceso de disolución de calcita, lo que no ocurre así en otros pozos y profundidades donde predominan procesos de precipitación de calcita o de intercambio iónico entre el calcio y el sodio.

Como puede apreciarse en la tabla 5, con un porcentaje de mezcla en el acuífero entre 28 y 70 % de agua de mar, se alcanzan incrementos de dureza (sin considerar la aportada por la mezcla a esas proporciones), que van creciendo con la salinización desde aproximadamente 250 hasta 450 mg/l. Estos incrementos se corresponden con los de los experimentos cinéticos de disolución agua-roca en condiciones de sistema cerrado respecto al  $\text{CO}_2$  y de mezcla con agua de mar (Tab. 3), donde la dureza aumentó desde alrededor de 240 a 400 mg/l, al variar el porcentaje de mezcla desde 0 hasta 10 %.





Tabla 5. Valores de  $\text{CaCO}_3$  determinados en las aguas del pozo Sotolongo Díaz (Cuenca Sur de la Habana), muestreado a los 50 m de profundidad en el intervalo 1997-1998.

% de mezcla	$\Delta\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)	$\text{CaCO}_3$ (mg/l)
27.5	5.16	258
38.6	6.24	321
44.9	9.16	458
58.7	8.77	439
60.5	8.47	424
68.6	9.08	454

## CONCLUSIONES

Mediante experimentos de interacción agua - roca carbonatada en el laboratorio, se obtuvo una composición química similar a la que se origina en los acuíferos cársicos, aunque con un contenido de  $\text{CaCO}_3$  menor en el acuífero.

De los parámetros que controlan el proceso de adquisición de la composición química en los experimentos de interacción agua - carbonato: temperatura, cantidad de roca, velocidad de agitación, disponibilidad de  $\text{CO}_2$ , este último resultó ser el más significativo. Los mayores contenidos de  $\text{CaCO}_3$  disueltos se obtuvieron en los experimentos de disolución de calizas en condiciones de sistema abierto con respecto al  $\text{CO}_2$  y con presiones de dióxido de carbono del orden de  $10^{0.2}$  atm. Estas condiciones pueden simular el vertido de residuales orgánicos biodegradables en el medio cársico.

Adicionalmente a la influencia de  $\text{pCO}_2$ , el efecto salino produce una mayor intensificación de la disolución química de los carbonatos en los acuíferos cársicos costeros, alcanzando las aguas subterráneas una mayor dureza en los mismos.

Las aguas de varios manantiales y pozos tomados como referencia en acuíferos cársicos desarrollados en zonas montañosas y llanas (Sierra del Rosario, Meseta del Guaso, Cuencas Jaruco, Aguacate y Sur en la Llanura Habana - Matanzas), alcanzan concentraciones  $\text{CaCO}_3$  de un orden algo menor que las obtenidas en los experimentos cinéticos de interacción agua roca carbonatada en condiciones de sistema cerrado respecto al  $\text{CO}_2$ .

En el pozo Sotolongo Díaz a 50 m (Cuenca Sur de La Habana), la dureza alcanzada en el proceso de interacción de las aguas subterráneas con la matriz rocosa, fue del orden del  $\text{CaCO}_3$  obtenido en los experimentos cinéticos en condiciones de sistema cerrado respecto al  $\text{CO}_2$  y de mezcla con agua de mar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez E. y J.R. Fagundo (1995). SIMUCIN: Sistema para el estudio cinético y la modelación de las reacciones de disolución de minerales. En: "El Karst y los acuíferos Kársticos, ejemplos y métodos de estudio". Ed. A. Pulido-Bosch, J.R. Fagundo, J. Rodríguez, Univ. Granada (España), 209-213.
- Alvarez, E., J.R. Fagundo, P. González, V. Ferrera, G. Benítez (1996). Aplicación de métodos de simulación química y matemática al estudio de la disolución de carbonatos en diferentes



condiciones experimentales. En: Contribuciones a la hidrogeología y medio ambiente en Cuba. Eds.: J.R. Fagundo Castillo, D. Pérez Franco, A. Alvarez Nodarse, J.M. García e I. Morell, Universidad de Castellón (España), 91-103.

4. APHA, AWWA, WPCF (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastes.
5. Berner R.A. and J.W. Morse (1974): Dissolution kinetics of calcium carbonate. *Am. J. Sci.* 274: 108-131.
6. Dreybrodt, W. (1992). Dynamics of karstification: A model applied to hydraulic structures in karst terrenes. *Applied Hydrogeology*, 3(92): 20-32.
7. Fagundo, J.R (1996). Química del Agua. En: *Hidroquímica del Karst*. Editores: J.R. Fagundo, J.J. Valdés y J.E. Rodríguez. Univ. Granada (España), 12-119.
8. Fagundo, J.R., E. Alvarez, G. Benítez, V. Ferrera, J. Vega (1996). Simulación química y matemática de la disolución de rocas carbonatadas por las aguas naturales. *Kras i speleologia*. T.8, XVII (Katowice): 78-90.
9. Fagundo, P. Gonzalez, J.R. (1999). Agricultural use and water quality at karstic west Cuban Southern Plain. In: *Karst and Agriculture in the World*. *International Journal of Speleology* (ISSN 0392-6672): 28 B (1/4): 175-185.
10. Fagundo, J.R., P. González, S. Jiménez, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, A. González, E. Romero, D. Orihuela (2002). Procesos geoquímicos naturales e inducidos por el hombre en acuíferos kársticos costeros. Caso de estudio: Sector hidrogeológico Güira Quivicán (Cuenca Sur de La Habana). *Revista Latinoamericana de Hidrogeología* (2): 71-79.
11. Fagundo, J.R., Castillo, M. Suárez Muñoz, P. González Hernández, J. Fagundo Sierra, C. Meleán Rodríguez (2003). Aplicaciones de la Química – Física en la Hidrogeología. En: *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*, Vol. 4, IX Taller. ISCTN (2003), ISBN 959-7136-20-1: 351-362.
12. González, P., J.R. Fagundo, V. Ferrera, G. Benítez, E. Alvarez (1997). "Simulación química de los procesos de interacción agua-roca carbonatada en diferentes condiciones experimentales" (MOD-01). En: *Memorias del III Taller de la Cátedra de Medio Ambiente*. La Habana 1997. 7 pp.
13. Roques, H. et C. Ek. (1973). Etude expérimentale de la dissolution des calcaires par une eau chargée de CO<sub>2</sub>, *Ann. Speleol.* 28 (4): 5490-563.
14. Sjoberg E.L. and D.T. Rickard (1984). Temperature dependence of calcite dissolution kinetics between 1 and 62 °C at pH 2,7 to 8,4 in aqueous solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 485-493.