

# Modelización hidrogeoquímica del agua de infiltración en la Cueva de Nerja (Málaga).

*Hydrogeochemical modeling of the drip water in the Nerja cave (Málaga).*

J. Cardenal<sup>(1)</sup>, J. Benavente<sup>(2)</sup>, B. Andreo<sup>(3)</sup> y F. Carrasco<sup>(3)</sup>

(1) Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Jaén, 23071 Jaén.

(2) Instituto del Agua de la Universidad de Granada, 18071 Granada.

(3) Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga, 29071 Málaga.

## ABSTRACT

*A hydrochemical study of the drip water in the Nerja Cave has been carried out using geochemical modeling. Results indicate that major ions in the infiltration water are meteoric in origin (evapotranspiration of rain water plus equilibrium with a soil  $P_{CO_2}$  of  $10^{-2.5}$  atm) but sequential dissolution of calcite and dolomite also occurs in an open system to  $CO_2$ . Moreover, because the low discharge rate of the drip water points, this water maintains long contact with the cave atmosphere before enough volume can be sampled for a complete analysis. Thus measured pH are strongly affected, so modeled pH are lower (even 0.3-0.6 pH-units) than those measured ones.*

**Keywords:** drip waters, hydrogeochemical modeling, Nerja Cave, Andalusia.

Geogaceta, 25 (1999), 63-65

ISSN: 0213683X

## Introducción y objetivos

Entre los controles ambientales que se llevan a cabo en la Cueva de Nerja (Fig. 1) están los relativos a las características físico-químicas de las aguas de precipitación sobre la misma y de goteo en varios puntos de su interior. En este trabajo se consideran los resultados obtenidos en 1994 en los dos goteros con registro más completo: denominados Rincón del Órgano y paso de la Sala de la Lanza a la de la Inmensidad. Dado que las variaciones temporales de la composición química en cada goteo son poco significativas, se ha trabajado con valores medios de las variables físico-químicas consideradas. En total se ha dispuesto de 16 análisis de cada punto y del agua de precipitación.

Debido sobre todo a la actividad neotectónica, la cueva se encuentra en la actualidad algunos metros por encima de la cota del manantial de Maro y del nivel de un sondeo próximo (Fig. 1). Con las condiciones climáticas actuales, unidas a eventuales modificaciones del flujo en la zona vadosa por encima de la cueva, los caudales de goteo al interior de la misma son bastante reducidos. Esto implica que

para obtener una muestra con volumen adecuado para realizar un análisis físico-químico suficientemente completo es necesario esperar un lapso de tiempo que puede llegar a ser de varios días. Esto conlleva alteraciones en el estado de equilibrio del sistema  $CO_2-H_2O$ , de manera que el pH medido en el momento de recogida de la muestra puede no ser representativo del pH en la zona no saturada. En este trabajo se pretende comprobar el citado proceso, además de modelizar las interacciones agua de precipitación-roca que conducen al agua de goteo.

## Metodología

La metodología utilizada ha consistido en la modelización hidrogeoquímica. Concretamente se ha empleado el modelo PHREEQE (Parkhurst *et al*, 1990). Este modelo calcula la composición química teórica de una solución acuosa si se imponen un conjunto de reacciones y condiciones termodinámicas determinadas.

Se ha adoptado como punto de partida la composición teórica del agua presente en la zona vadosa del acuífero por encima de la Cueva. Esta composición se obtiene a partir de la correspondiente al

agua de precipitación, a la que se añaden los efectos derivados de una reacción de equilibrio con una presión de  $CO_2$  en el suelo de  $10^{-2.5}$  atm a la temperatura media del aire en el sector y de un factor de concentración por evapotranspiración de un 45%. El primer valor se ha obtenido a partir de la evapotranspiración real, mediante la expresión de Brook *et al* (1983; en Appelo y Postma, 1993). El segundo valor se ha calculado a partir de la relación entre los contenidos de los iones  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$  del agua de lluvia y de los dos goteros considerados. El resto de los iones mayoritarios no se ha tenido en cuenta por considerar que también pueden ser aportados por la roca. Se han rechazado los datos relativos al catión  $K^+$  por registrar valores altamente variables (Carrasco *et al*, 1996). A partir de la citada composición teórica se han modelizado diversas reacciones reversibles con la roca. Sólo se han tenido en cuenta modificaciones en el contenido de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , procedentes de la disolución de dolomita y calcita, además de los constituyentes del sistema  $CO_2-H_2O$ .

La modelización se ha realizado en dos pasos, ambos en sistema abierto al  $CO_2$  ( $10^{-2.5}$  atm). En primer lugar, una di-

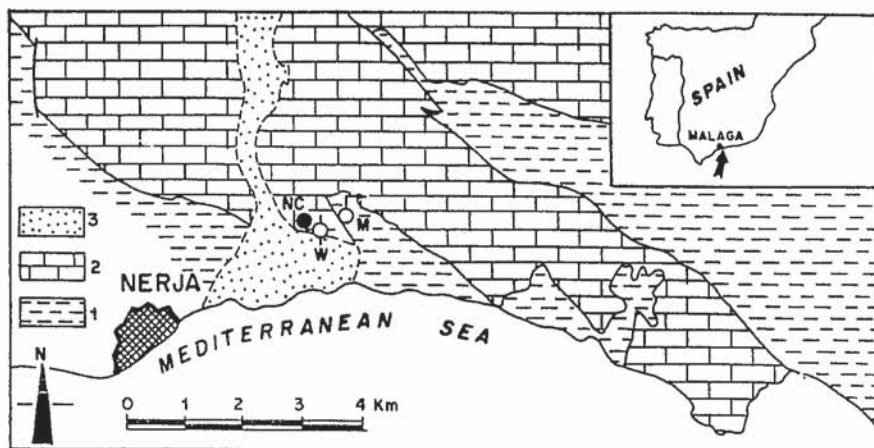


Figura 1.- Situación y encuadre hidrogeológico de la Cueva de Nerja (NC). (1) Substrato metapelítico alpujarride, (2) acuífero carbonatado alpujarride, (3) materiales neógenos y cuaternarios. (M) Manantial de Maro, (W) sondeo.

Figure 1.- Location and hydrogeological setting of the Nerja Cave (NC). (1) Alpujarride metapelite substratum, (2) Alpujarride carbonate aquifer, (3) Neogene-Quaternary sediments. (M) Maro spring, (W) well.

solución secuencial de calcita y dolomita con un incremento de la temperatura hasta 20°, valor próximo a la temperatura media de la roca. Se ha impuesto un equilibrio con respecto a la calcita de acuerdo con la rápida cinética de la reacción y un tiempo de contacto agua-roca suficiente como para que tenga lugar dicha reacción. En relación con la dolomita se ha considerado un valor de límite superior del rango generalmente admitido para la condición de equilibrio (log IS = ±0.5), para obtener así contenidos en Mg<sup>2+</sup> del orden de los medidos en los goteros.

En un segundo paso, se considera sólo reacción con la calcita y un valor de log IS de +0.5. Esto obedece, por un lado, a obtener contenidos en Ca<sup>2+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> del orden de magnitud encontrados en los goteros. Por otro lado, se trata de simular condiciones termodinámicas encontradas frecuentemente en acuíferos carbonatados de flujo difuso (con presencia de dolomías y, ocasionalmente, yesos), en los que puede existir una ligera sobresaturación por condiciones cinéticas previamente a la precipitación de calcita (Plummer *et al*, 1990). Este aspecto se ha iden-

tificado en otros acuíferos alpujarrides próximos (Cardenal *et al*, 1994).

**Resultados**

En la tabla 1 se resumen los principales resultados numéricos relativos a la modelización del paso del agua en el suelo a agua en la zona no saturada, incluyendo en esta última categoría las dos etapas con diferentes condiciones especificadas en el apartado anterior. También se indican aquellos casos en los que algún valor ha sido impuesto durante la modelización. Además, se incluyen las transferencias de masas entre las diferentes etapas.

A efectos de contrastar la bondad de los resultados, en la tabla 1 se han incluido también los rangos de valores medidos en un número mayor de goteros en el interior de la cueva (Andreo y Carrasco, 1993). Se advierte como los valores correspondientes a la etapa final de modelización son aceptablemente similares a los valores medidos, salvo en caso del pH, algo inferior en la modelización.

**Discusión**

Los resultados anteriores indican que la modelización ilustra suficientemente sobre las características físico-químicas del agua de los goteros. La discrepancia

(A)		(B1)		(B2)		(RES)		
AGUA EN EL SUELO		ZONA NO SATURADA		ZONA NO SATURADA			MAX	MIN
t <sup>a</sup>	16.5	t <sup>a</sup>	20.0	t <sup>a</sup>	20.0	pH	8.60	8.25
pH	7.06	pH	7.83	pH	7.93	Ca <sup>2+</sup>	48.2	20.7
Ca <sup>2+</sup>	5.6	Ca <sup>2+</sup>	21.7	Ca <sup>2+</sup>	44.5	Mg <sup>2+</sup>	45.7	27.7
Mg <sup>2+</sup>	6.6	Mg <sup>2+</sup>	35.5	Mg <sup>2+</sup>	35.5	Na <sup>+</sup>	9.4	5.5
Na <sup>+</sup>	4.9	Na <sup>+</sup>	4.9	Na <sup>+</sup>	4.9	K <sup>+</sup>	2.3	0.8
K <sup>+</sup>	2.5	K <sup>+</sup>	2.5	K <sup>+</sup>	2.5	Alc	328.3	237.1
Alc	40.2	Alc	234.9	Alc	303.8	Cl <sup>-</sup>	32.8	20.6
Cl <sup>-</sup>	21.7	Cl <sup>-</sup>	21.7	Cl <sup>-</sup>	21.7	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	30.7	11.8
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	30.0	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	30.0	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	30.0			
IgPco <sub>2</sub> (*)	-2.50	IgPco <sub>2</sub> (*)	-2.50	IgPco <sub>2</sub> (*)	-2.50			
IScal	-2.07	IScal (*)	0.00	IScal (*)	0.50			
ISdol	-3.85	ISdol (*)	0.50	ISdol	1.19			
		ISyes	-2.59	ISyes	-2.32			

(A) -> (B1) transfers: -0.79 mM CAL, +1.19 mM DOL, +1.55 mM CO<sub>2</sub>  
 (B1) -> (B2) transfers: +0.57 mM CAL, +0.54 mM CO<sub>2</sub>  
 (\*) valor forzado

Tabla 1.- Resultados de la modelización hidrogeoquímica. Contenidos iónicos y alcalinidad en mg/l. Transferencias de masas en mmol/kg H<sub>2</sub>O. Índices de saturación y P<sub>CO<sub>2</sub></sub> expresados en forma logarítmica. (RES): Resumen de datos de goteros del interior de la cueva.

Table 1.- Numerical results of the hydrogeochemical modeling. Ionic contents and alkalinity in mg/l. Mass transfers in mmol/kg H<sub>2</sub>O. Saturation indices and P<sub>CO<sub>2</sub></sub> in log form. (RES): summary of drip water data inside the cave.

apuntada en relación con los valores de pH debe estar causada por el proceso de desgasificación que experimentan las aguas recogidas en los goteros de manera previa a su medida. En este sentido, hay que indicar que los contenidos de  $\text{CO}_2$  en el interior de la cueva están comprendidos entre 300 y 1300 ppm (Carrasco *et al*, 1996) que equivalen, respectivamente, a  $10^{-3.52}$  atm y  $10^{-2.89}$  atm, mientras que para el agua de infiltración se había establecido un valor superior ( $10^{-2.5}$  atm).

De acuerdo con los equilibrios implicados en el sistema  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-roca}$ , esta desgasificación iría acompañada posteriormente de un proceso de precipitación de  $\text{CaCO}_3$ , como también corresponde a la naturaleza sobresaturada en dicha fase mineral de este tipo de aguas (aspecto que, actualmente, está bajo estudio). De hecho, el carácter incrustante de las aguas de goteo es un aspecto fácilmente constatable *in situ* (Andreo y Carrasco, 1993).

Este efecto del incremento del pH (variaciones de hasta 0.6 unidades) a medida que aumenta el tiempo de contacto del agua muestreada con la atmósfera de la cueva se ha podido constatar experimentalmente en distintos puntos del interior de la misma. También se constata la disminución asociada en la conductividad eléctrica del agua en

muestras recolectadas durante varios días, como consecuencia del mencionado proceso de precipitación.

### Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo corroboran que los principales iones presentes en el agua de infiltración de la Cueva de Nerja tienen un origen meteórico (concentración por evapotranspiración del agua de lluvia y equilibrio con una  $p\text{CO}_2$  del suelo de  $10^{-2.5}$  atm), junto a una interacción agua-roca que implica la disolución secuencial de calcita y dolomita. Esto también es lo que indican los datos isotópicos disponibles de las aguas de goteo y precipitación (Caballero *et al*, 1996).

Los escasos caudales de goteo obligan a que las muestras de este tipo de agua deban permanecer en contacto con la atmósfera de la cueva durante periodos más o menos prolongados antes de que sus características físico-químicas sean determinadas. La variable más afectada por esta circunstancia es el pH, de manera que los valores registrados son sistemáticamente superiores a los que deben existir en el momento en que el agua de infiltración alcanza el techo de la cueva y comienza el goteo.

### Agradecimientos

Esta investigación ha sido subvencionada por el Patronato de la Cueva de Nerja.

### Referencias

- Andreo, B. y Carrasco, F. (1993): *Trabajos sobre la Cueva de Nerja: Geología de la Cueva de Nerja* (ed. F. Carrasco), 3, 161-188.
- Appelo, C.A.J. y Postma, D. (1993): *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema Publ. Rotterdam, 536 p.
- Caballero, E., Jiménez de Cisneros, C. y Reyes, E. (1996): *Applied Geochemistry*, vol. 11, 583-587.
- Cardenal, J., Benavente, J. y Cruz-Sanjuán, J.J. (1994): *Journal of Hydrology*, 161, 3-30.
- Carrasco, F., Andreo, B., Liñán, C. y Vadiello, I. (1996): en: *Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria. 249-263.
- Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C. y Plummer, L.N. (1980): *U.S. Geol. Survey, Water Res. Inv.* 80-96, 210 p. (versión actualizada de 1990).
- Plummer, L.N., Busby, J.F., Lee, R.W. y Hanshaw, B.B. (1990): *Water Resources Research*, 26, 1981-2014.