

# Funcionamiento hidrodinámico del epikarst de la Cueva de Nerja (Málaga)

*Hydrodynamic behaviour of the epikarst of the Nerja Cave (Málaga)*

B. Andreo Navarro, C. Liñán Baena, F. Carrasco Cantos e I. Vadillo Pérez

Grupo de Hidrogeología. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n, 29071-Málaga

## ABSTRACT

*The Nerja Cave allows to study the hydrodynamic functioning of the epikarst of the aquifer in which it is developed. The hydrograph of the drip water inside the Cave, versus the precipitations, and the application of the correlatory and spectral analysis to the long series of data precipitation-dripwater flow, shows the inertial behaviour of the epikarst and the importance of the water stored in its hydrodynamic behaviour. The hydrochemical information, particularly the use of  $K^+$  and  $^{18}O$  content, confirms these results.*

**Key words:** correlatory and spectral analysis, epikarst, hydrochemistry, hydrodynamic, Nerja Cave

*Geogaceta*, 31 (2002), 7-10

ISSN:0213683X

## Introducción

La Cueva de Nerja, con un volumen aproximado de 300.000 m<sup>3</sup>, está situada en el extremo suroriental de la provincia de Málaga, a unos 5 km al este de la localidad de Nerja y a unos 500 m al norte del pueblo costero de Maro. La cavidad se ubica en la vertiente meridional de Sierra Almjara, a 158 m s.n.m. y, dentro de ella, se distinguen dos sectores: una zona habilitada al turismo (Galerías Turísticas ó Bajas), que ocupa aproximadamente un tercio del volumen total de la cavidad y una zona no turística (Galerías Altas y Galerías Nuevas), que constituye los dos tercios restantes. Su desarrollo es prácticamente horizontal, situándose entre las cotas 123 y 191 m s.n.m. (SEM, 1985).

Desde el punto de vista geológico, la cueva se sitúa en materiales pertenecientes al Complejo Alpujárride de la Cordillera Bética (Andreo *et al.*, 1993), concretamente en la Unidad de Almjara. La serie estratigráfica de esta Unidad está formada por una sucesión metapelítica inferior de edad Paleozoico y un conjunto superior carbonatado, formado por mármoles dolomíticos (en los que se desarrolla la cueva) y calizos, de edad Trías medio-superior. Estos mármoles, permeables por fracturación y karsificación, forman parte del acuífero carbonatado de Sierra Almjara.

En la actualidad, la cueva está situada en la zona no saturada del acuífero, varios metros por encima del nivel piezométrico,

como consecuencia del levantamiento tectónico de Sierra Almjara, durante el Plioceno y el Cuaternario. Independientemente de su interés turístico, la cavidad permite estudiar los procesos hidrogeológicos en la zona no saturada del karst en este sector del acuífero, tanto desde el punto de vista hidrodinámico como hidroquímico.

Desde 1991 hasta la actualidad se realiza un control sistemático del caudal de goteo y de la composición química e isotópica de las aguas que gotean en el interior de la cavidad, así como de las aguas de precipitación que se recogen en la estación meteorológica instalada en el exterior de la cueva.

En el interior de la cueva se ha elegido un gotero representativo situado en las Galerías Turísticas, el gotero del Rincón del Órgano, en el que se controlan los siguientes parámetros: caudal de goteo, conductividad eléctrica, pH y temperatura del agua, composición química (componentes mayoritarios) y composición isotópica ( $^{18}O$  y  $^2H$ ). En el agua de lluvia recogida en el exterior se controlan los mismos parámetros que en el agua de goteo.

En este trabajo, se analizan los datos hidrodinámicos e hidroquímicos disponibles, para caracterizar el funcionamiento del epikarst situado encima de la cavidad.

## Hidrodinámica

El estudio hidrodinámico ha consistido en un análisis cualitativo del hidrogra-

ma registrado en el gotero del Rincón del Órgano y en un tratamiento de las series de datos de precipitación-caudal de goteo mediante la aplicación del análisis correlatorio y espectral.

### *Evolución temporal del caudal de goteo*

La evolución temporal del caudal en el gotero del Rincón del Órgano, cuyo valor medio es de 89 cm<sup>3</sup>/día, presenta una forma general ondulada (Fig. 1A), con valores máximos durante los meses de verano-otoño y mínimos en invierno-primavera (Carrasco *et al.*, 1995, 1996; Liñán *et al.*, 1999, 2000). Dada la distribución anual de las precipitaciones existente en la región estudiada, con un marcado período húmedo durante los meses de Noviembre a Enero y un período seco durante el verano, cabe pensar que existe una circulación lenta del agua de lluvia a través del epikarst de la cueva. Según estos datos, se produce un desfase estacional desde que el agua de lluvia entra en el acuífero hasta que aparece en los puntos de goteo.

Se trata, por lo tanto, de un sistema inercial, que tarda mucho tiempo en responder a las lluvias y que presenta un gran poder modulador de la señal de entrada. Sólo en épocas en las que la recarga es importante (como ocurrió a principios de 1997), se produce un claro y rápido aumento del caudal de goteo en el interior de la cavidad (Fig. 1a), cuya mag-

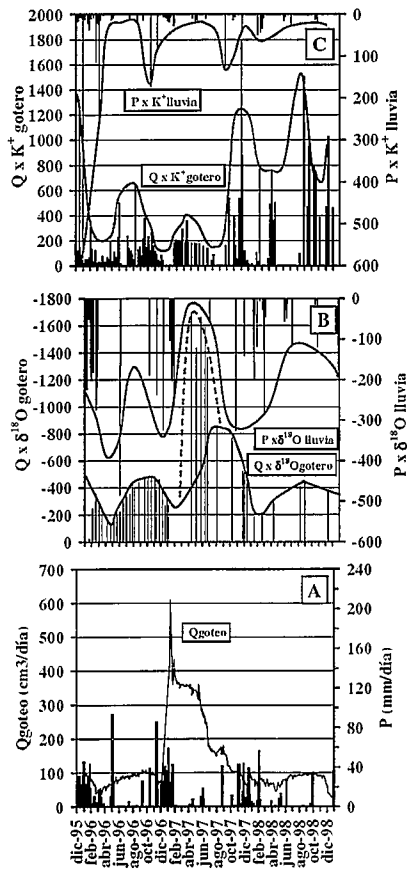


Fig. 1.- (A) Evolución temporal del caudal de goteo en el Rincón del Órgano. (B) Flujos de entrada y de salida de <sup>18</sup>O. (C) Flujos de entrada y salida de K<sup>+</sup>.

Fig. 1.- (A) Temporary evolution of drip water flow. (B) Input and output flows of <sup>18</sup>O in the rain water and in the drip waters. (C) Input and output flows of K<sup>+</sup> in the rain water and in the drip waters.

nitid depende de la cuantía de la recarga y de la cantidad de agua almacenada en el epikarst de la cueva, antes de producirse la precipitación.

Aplicación del análisis correlatorio y espectral

Con la serie de datos diarios de precipitación y de caudal de goteo correspondiente a los años hidrológicos 1993/94-1997/98, ambos inclusive, se ha realizado un análisis correlatorio y espectral (Box y Jenkins, 1976; Mangin, 1981, 1984). Dada la longitud de la serie de datos, se han realizado dos análisis: uno de corta duración, con un valor de truncamiento de 125 días y un paso de tiempo diario y otro de larga duración, con un valor de truncamiento de 600 días y un paso de tiempo de 5 días.

a) Análisis de la señal de entrada

En el análisis a corto plazo, el correlograma simple obtenido para la lluvia (Fig. 2A) decrece muy rápidamente,

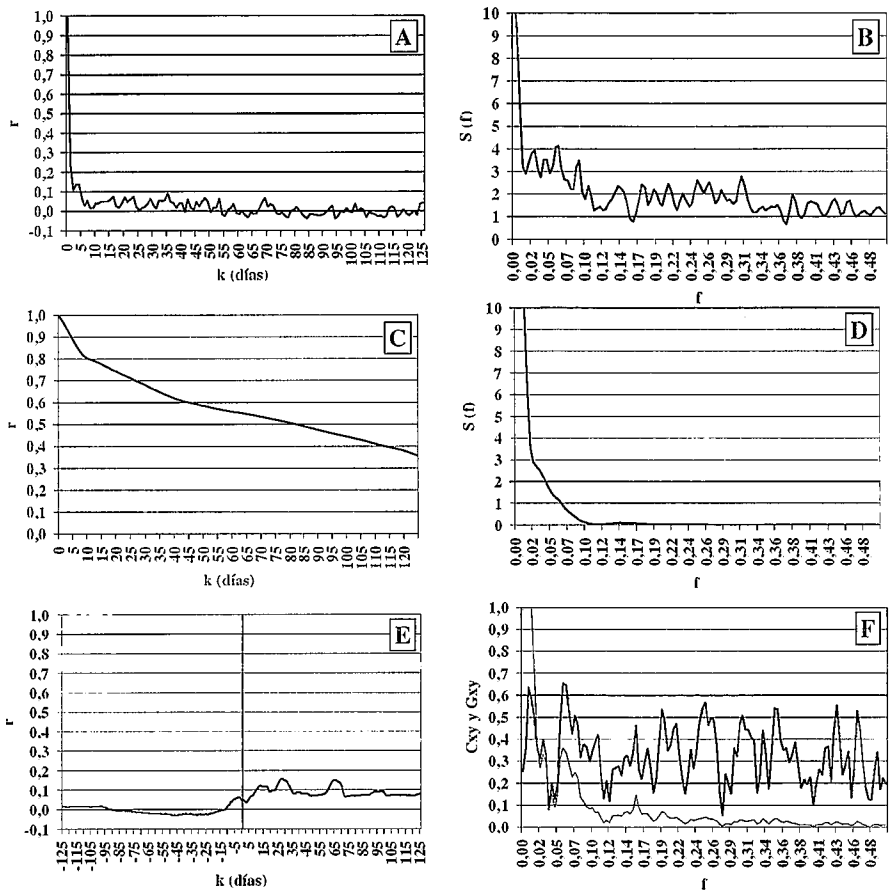


Fig. 2.- Results of correlatory and spectral analysis (m=125 days, k=1 day). Fig. F: gain (thin line), coherence (thick line).

Fig. 2.- Results of correlatory and spectral analysis (m=125 days, k=1 day). Fig. F: gain (thin line), coherence (thick line).

lo cual indica que se trata de un fenómeno aleatorio. El efecto memoria (valor de k para r= 0.1-0.2) es muy pequeño, del orden de 1-2 días. En el espectro simple (Fig. 2B) se observa una tendencia muy marcada para las bajas frecuencias y algunas periodicidades menores a la anual (18 y 36 días). En el espectro del análisis de larga duración (Fig. 3A), se comprueba que dicha tendencia corresponde a un ciclo de periodicidad anual.

b) Análisis de la señal de salida

El correlograma de la crónica de caudales obtenido para el análisis de corta duración es muy tendido (Fig. 2C), lo cual indica que el epikarst de la cueva presenta un comportamiento muy inercial. El efecto memoria es importante, del orden de 6 meses, como se observa en el correlograma de larga duración (Fig. 3B).

En el espectro simple de los caudales (Fig. 2D), se aprecia una tendencia correspondiente a las bajas frecuencias y no aparecen los picos observados en el espectro simple de la lluvia, es decir, el sistema filtra por completo la señal de entrada. El tiempo de regulación obtenido a

partir del espectro simple del caudal (valor del espectro para f=0, dividido por 2) es bastante elevado: 85 días. La banda espectral es estrecha, con una frecuencia de corte de 0.10, lo que significa que la información lluvia es filtrada al cabo de 10 días. En el espectro simple de los caudales obtenido del análisis a largo término, se constata la existencia de una periodicidad anual bien marcada.

c) Análisis cruzado (entrada-salida)

El correlograma cruzado obtenido en el análisis, tanto de corta (Fig. 2E) como de larga duración (Fig. 3C), es muy extendido, prácticamente horizontal. Además, el valor máximo de r es muy bajo, inferior a 0.2. Estos datos confirman la elevada inercia del sistema.

En el análisis de larga duración, la función de amplitud cruzada (Fig. 3D) muestra el pico correspondiente al ciclo anual observado en el espectro simple (Fig. 3A). El desfase existente entre la entrada y la salida para este pico anual, calculado mediante la función de fase, es del orden de 6 meses.

La coherencia es bastante baja, con un valor medio de la función de 0.3 (Fig.

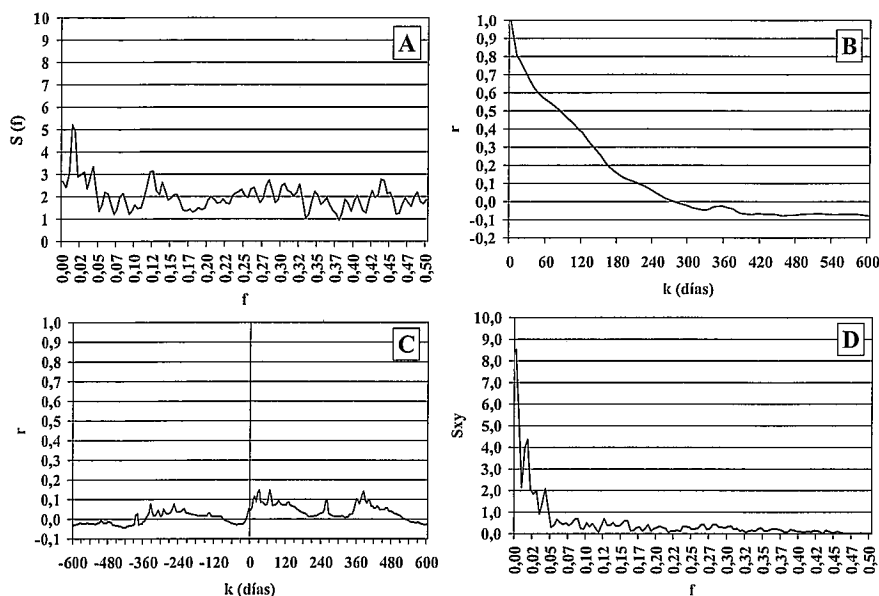


Fig. 3.- Gráficos del espectro simple de la lluvia (A), correlograma simple del caudal (B), correlograma cruzado (C) y función de amplitud cruzada (D), correspondientes al análisis de larga duración (ventana de observación de 600 días, paso de tiempo de 5 días).

Fig. 3.- Simple spectre of precipitation (A), simple correlogram of outflow (B), cross-correlogram (C) y cross-amplitude (D), corresponding to the long term analysis ( $m = 600$  days,  $k=5$  days).

2F), lo que significa que el sistema no es lineal (no existe una correlación lineal entre la lluvia y el caudal de goteo). En lo que respecta a la función de ganancia (Fig. 2F), se observa una importante atenuación de la señal de entrada prácticamente para todas las frecuencias (superiores a 0.016). Así, señales de entrada caracterizadas por periodicidades inferiores a 63 días son atenuadas por el sistema, mientras que las variaciones estacionales en la señal de entrada son amplificadas por el sistema.

Al comparar los correlogramas simples del caudal de goteo de dos años hidrológicos con diferente pluviometría (Fig. 4), se observa que, en el año 1994/95, en el que se registró 145 mm de lluvia, el efecto memoria obtenido del correlograma es de 61 días, mientras que, en el año 1996/97, en el que la precipitación registrada fue mucho mayor, 858 mm, el efecto memoria es de 40 días. Por lo tanto, se concluye que el epikarst de la cueva muestra un comportamiento más inercial (menores variaciones del caudal de goteo) en un año seco que en un año húmedo. En un año seco, gran parte de la lluvia se emplea en restituir las reservas del epikarst mientras que, en un año húmedo, el acuífero epikárstico se recarga más rápidamente, aumentando antes y en mayor cuantía el caudal de los goteros de la cueva. Este hecho confirma el papel que juega la cantidad de agua almacenada en el epikarst, antes de registrarse

las precipitaciones, en el funcionamiento hidrodinámico del sistema. Estos resultados están en consonancia con los obtenidos en la Cueva del Agua (Granada) por Sánchez-Martos *et al.* (1999).

#### Hidroquímica

Las aguas recogidas en el gotero del Rincón del Órgano son de facies bicarbonatada magnésico-cálcica, debido a la naturaleza dolomítica de los mármoles por los que circula y tienen una conductividad eléctrica media de 468  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Son aguas de claro origen meteórico, como demuestra su composición química e isotópica y están sobresaturadas en calca durante todo el año, por lo que se produce depósito de carbonato cálcico (Andreo y Carrasco, 1993; Reyes *et al.*, 1994; Caballero *et al.*, 1996; Carrasco *et al.*, 1996; Liñán *et al.*, 1999). Este hecho acentúa el carácter magnésico-cálcico de las aguas.

En el agua de goteo se registran, esporádicamente, contenidos muy elevados en  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , que previamente se detectan en el agua de precipitación, por lo que estos componentes pueden ser utilizados como trazadores naturales. El análisis de los flujos de entrada y salida de  $\text{K}^+$  (Fig. 1C) ha permitido estimar, de forma aproximada, que el tiempo de tránsito desde que el agua de lluvia cae sobre la superficie hasta que llega al interior de la cavidad varía entre 2 y 8 meses, dependiendo de la cantidad e intensidad de la

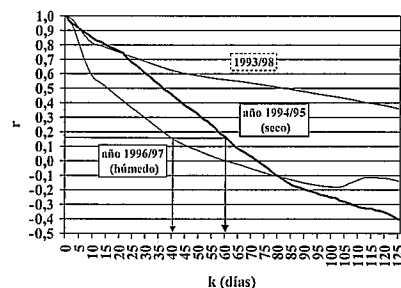


Fig. 4.- Comparación de los correlogramas simples del caudal de goteo para dos años hidrológicos con diferente pluviometría.

Fig. 4.- Simple correlograms of drip outflow corresponding to two hydrological years of different pluviometry.

precipitación registrada antes, durante y después de la caída de la lluvia rica en  $\text{K}^+$  y del camino que sigue ésta a través de las fisuras del epikarst (Liñán *et al.*, 1999). Estos resultados corroboran los obtenidos a partir del estudio hidrodinámico, en el sentido de que existe una circulación lenta del agua de lluvia a través del epikarst de la cueva, salvo durante las épocas en las que se registran precipitaciones especialmente importantes, tanto en magnitud como en intensidad, las cuales provocan un tránsito más rápido del agua de lluvia hacia el interior de la cueva.

#### Composición isotópica

Las lluvias recogidas en los meses de verano presentan, por lo general, contenidos en  $^{18}\text{O}$  más elevados que las recogidas en invierno. Por el contrario, en el gotero del Rincón del Órgano, las muestras recogidas durante el invierno presentan mayores contenidos en  $^{18}\text{O}$  que las recogidas en verano. El análisis de los flujos de entrada y de salida del contenido en  $^{18}\text{O}$  (Fig. 1B) permite corroborar, una vez más, el desfase estacional (del orden de seis meses como valor medio) existente entre la caída de la lluvia sobre la superficie de la cueva hasta su salida por los goteros. Así, el agua de lluvia de invierno, con menor contenido en  $^{18}\text{O}$ , se drena por el gotero en verano, mientras que las caídas en verano, con mayores contenidos isotópicos, se drenan por el gotero en invierno.

#### Conclusiones

El control hidrodinámico, hidroquímico e isotópico, desde 1991 hasta la actualidad, del agua de goteo recogida en la Cueva de Nerja, así como del agua de lluvia muestreada en la estación meteorológica del exterior, permite caracterizar el

funcionamiento hidrodinámico del epikarst situado por encima de la cavidad.

En la evolución temporal del caudal de goteo, se observa un desfase estacional con respecto a las precipitaciones, lo que está en consonancia con los resultados del análisis correlatorio y espectral efectuado con los datos diarios de precipitación-caudal correspondientes a 5 años hidrológicos. El epikarst de la Cueva de Nerja presenta un comportamiento muy inercial, tarda mucho tiempo en responder a las lluvias y presenta un gran poder modulador de la señal de entrada. El efecto memoria es muy importante (del orden de medio año), el tiempo de regulación es elevado (85 días), la banda espectral es estrecha, con una frecuencia de corte de 0.10 (10 días) y el desfase entrada-salida, para sucesos de periodicidad anual, es del orden de 6 meses.

La cantidad de agua almacenada en el epikarst antes de registrarse las precipitaciones juega un papel muy importante en el funcionamiento hidrodinámico del sistema, ya que éste muestra un comportamiento menos inercial en un año húmedo que en un año seco.

El empleo como trazador del contenido en  $K^+$ , tanto del agua de lluvia como del agua de goteo, así como el análisis de los flujos de entrada y salida

del contenido en  $^{18}O$ , corroboran los resultados obtenidos del estudio hidrodinámico. Existe una circulación lenta del agua de lluvia a través del epikarst de la cueva (entre 6 y 8 meses de tiempo de tránsito), salvo durante las épocas en las que se registran precipitaciones especialmente importantes en magnitud o intensidad, en las que el tránsito del agua de lluvia hacia el interior de la cueva se realiza más rápidamente (hasta 2 meses de tiempo de tránsito).

#### Agradecimientos

Trabajo financiado por la Fundación Cueva de Nerja, que constituye una contribución del Grupo RNM 308 de la Junta de Andalucía al Proyecto IGCP-448 de la UNESCO y al Proyecto PB98-1397 de la DGES.

#### Referencias

Andreo, B., Carrasco, F. y Sanz de Galdano C. (1993): *Geología de la Cueva de Nerja. Trabajos sobre la Cueva de Nerja* (Carrasco F., ed.), 3, 25-50.  
 Andreo, B. y Carrasco, F. (1993): *Geología de la Cueva de Nerja. Trabajos sobre la Cueva de Nerja* (F. Carrasco, ed.), 299-328.  
 Box, G.E.P. y Jenkins, G.M. (1976): *Time*

*Series Analysis: Forecasting and control*, 575 p.  
 Caballero, E., Jiménez de Cisneros, C. y Reyes, E. (1996): *Appl. Geochemistry*, 583-587.  
 Carrasco, F., Andreo, B., Benavente, J. y Vadillo, I. (1995): *Cave and Karst Science*, 21, 27-32.  
 Carrasco, F., Andreo, B., Liñán, C. y Vadillo, I. (1996): *Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 249-263.  
 Liñán, C., Andreo, B., Carrasco, F. y Vadillo, I. (1999): *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. B. Andreo, F. Carrasco y J.J. Durán (eds), 393-402.  
 Liñán, C., Andreo, B., Carrasco, F. y Vadillo, I. (2000): *Geotemas*, 1(3), 341-344.  
 Mangin, A. (1981): *C.R. Acad. Sci. Paris*, 293, 1011-1014.  
 Mangin, A. (1984): *Jour. Hydrol.*, 67, 25-43.  
 Reyes, E., Caballero, E., Jiménez de Cisneros, C., Delgado, A., Mirasol, M.D. y Núñez, R. (1994): *Estudio isotópico de las aguas de infiltración de la Cueva de Nerja*, 26 p.  
 Sánchez-Martos, F., Calaforra, J.M. y González-Ríos, M.J. (1999): *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. B. Andreo, F. Carrasco y J.J. Durán (eds), 371-380.  
 S.E.M. (1985): *La Cueva de Nerja*, 87 p.