

Características físico-químicas de las aguas de goteo en las "Galerías Altas" de la Cueva de Nerja (Málaga). Incidencia de los procedimientos de medida

Physical-Chemical characteristics of the drip water in the "High Galleries" of the Nerja Cave (Malaga, Spain). Incidence of sampling procedures

J. Benavente Herrera ⁽¹⁾, C. Liñán Baena ⁽²⁾, I. Bessens ⁽¹⁾ y F. Carrasco Cantos⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Ramón y Cajal, 4. Edificio Fray Luis de Granada. 18071 Granada

⁽²⁾ Grupo de Hidrogeología. Departamento de Geología. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n. 29071 Málaga

ABSTRACT

The physical-chemical characteristics (temperature, pH and electrical conductivity) of the drip water in the "High Galleries" (non-touristic zone) of the Nerja Cave have been monitored along the 2000 year. The results obtained indicate that the values of temperature and electrical conductivity are higher than those found in the touristic area and the pH values are smaller. This trend is thought to be induced by spatial changes in the P_{CO_2} of the cave atmosphere which, in turn, must reflect the fluxes of visitors as well as by other effects (ventilation, etc.). The identified trend is opposite to the one stated in a previous study (1991-1993). The reason is supposed to be a consequence of the different time elapsed from the dripping to the the measurement of the physico-chemical variables in each study, being shorter in the present. The exposition of the water samples to the cave atmosphere induces the off-gasing of CO_2 and the precipitation of $CaCO_3$, thus decreasing the electrical conductivity and increasing the pH. In addition, a general direct relationship between the conductivity and the drip water flow has been shown.

Key words: caves, drip water, hydrochemistry, carbonate equilibria, karst, Nerja

Geogaceta, 31 (2002), 11-14
ISSN:0213683X

Introducción: antecedentes y objetivos

El agua de goteo al interior de la Cueva de Nerja ha sido objeto de control, con diferente periodicidad y detalle, desde el año 1991. Las variables controladas más frecuentemente son el caudal de goteo, la conductividad eléctrica, el pH y la temperatura del agua, aunque también hay análisis de los componentes químicos disueltos y de los isótopos estables. Los primeros resultados pusieron de manifiesto la existencia de un tipo particular de aguas de goteo, localizadas en puntos cerca de la entrada a la cueva, más mineralizadas que el resto porque proceden del agua de un sondeo próximo empleada en el riego de los jardines que existen sobre esa parte de la cavidad (Andreo y Carrasco, 1993; Carrasco y Andreo, 1993). Con esta excepción, el resto de los goteros controlados, cuya localización se incluye en la figura 1, se supone que corresponden fun-

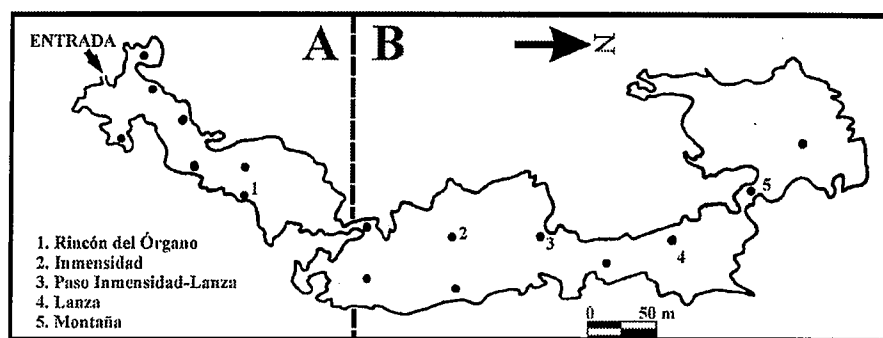


Fig. 1.- Planta de la Cueva de Nerja, localización de los goteros en los que se han hecho medidas y referencia de los considerados en el presente estudio. A: Galerías Turísticas, B: Galerías Altas.

Fig. 2.- Sketch of the Nerja Cave with location of the measured drip points; numbers refer to those considered in this study. A: Touristic Galleries, B: High Galleries.

damentalmente a la infiltración del agua de precipitación local a través de los mármoles calizos y dolomíticos triásicos en los que se desarrolla la cavidad.

En la figura 1 se distingue entre la zona visitable de la cueva, o Galerías Turísticas, y la de acceso restringido o Galerías Altas, que supone una proporción

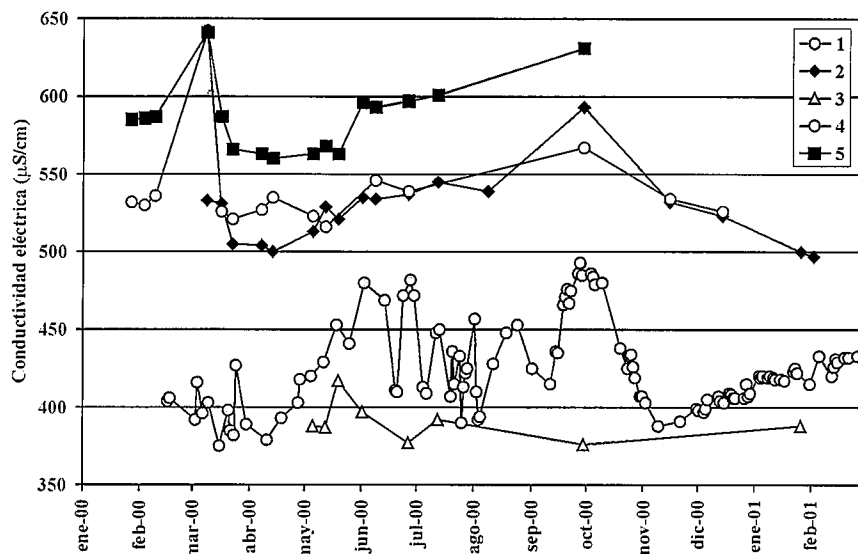


Fig. 2.- Evolución de los valores de conductividad eléctrica del agua en los puntos de control.

Fig. 2. - Evolution of the values of electrical conductivity of the water in the monitored drip points.

mayoritaria de la cavidad. Entre 1991 y 1993 se controlaron goteos en ambas partes con periodicidad aproximadamente mensual (Carrasco y Andreo, 1993 y Carrasco *et al.*, 1995). Conviene indicar que la difícil accesibilidad de las Galerías Altas y el escaso caudal de la mayoría de los goteros, generalmente inferior a 1 cm³/min, obligaba a demorar al menos un día la realización de las medidas. A partir de 1994 los controles se centraron en un único punto (el denominado Rincón del Organo: n° 1 en la Fig. 1), aunque se incrementó la frecuencia de obtención de datos. Así, algunas variables se han medido diariamente e incluso cada hora. Entre las variables registradas de este modo conviene destacar la concentración de CO₂ en el aire de la cavidad, estrechamente relacionada con la afluencia de visitantes, tanto a nivel diario como estacional, con máximos, en este último caso, en los meses de verano y durante la Semana Santa (Carrasco *et al.*, 1995; Liñán *et al.*, 1999).

En los antecedentes citados se ha puesto de manifiesto que la conductividad eléctrica del agua de goteo está condicionada fundamentalmente por los contenidos en Ca²⁺ y HCO₃⁻. También que este agua se encuentra sobresaturada en calcita y en dolomita y que la sobresaturación es mayor en invierno que en verano.

La modelización hidrogeoquímica del agua de goteo en el punto n° 1 (Cardenal *et al.*, 1999 a y b) ha puesto de manifiesto, entre otros aspectos, la influencia de la demora en las medidas en los valores de pH y conductividad eléctrica de las muestras. Esto se interpreta como debido a la desgasificación de CO₂ que experi-

menta el agua de infiltración al entrar en contacto con la atmósfera de la cavidad, produciéndose la precipitación de CaCO₃ y disminuyendo la conductividad al par que aumenta el pH.

Durante buena parte del año 2000 se ha muestreado de nuevo el agua de goteo en las Galerías Altas (puntos 2 a 5, Fig. 1), lo que constituye el objeto de este trabajo, centrado en las características físico-químicas registradas *in situ*. La frecuencia ha sido semanal o quincenal, aunque hay lapsos más o menos dilatados sin datos al no haber sido posible el acceso. La principal novedad estriba en que, con la excepción del punto n° 3, las medidas se han realizado de manera prácticamente simultánea a la toma de las muestras.

Resultados

En la tabla 1 se presenta un resumen estadístico de las variables físico-químicas controladas en los cuatro puntos seleccionados de las Galerías Altas. Se incluyen también los datos obtenidos en el punto de referencia de la zona visitable (n° 1). De dicha tabla se desprende que la temperatura media del agua es ligeramente inferior en la zona visitable (18,6°C en el punto n° 1 frente a 20,3°C de promedio para los otros cuatro). En el punto n° 3 se registran los valores más bajos de conductividad eléctrica del agua (entre 370 y 420 mS/cm, aproximadamente), lo que representa una excepción que luego se comentará. También registra este punto el valor más alto de pH (media de 8,4). Sin contar este punto, la conductividad eléctrica es superior en las aguas de las Galerías Altas (entre aproximadamente

500 y 650 mS/cm, con media general de 550 mS/cm) que en la zona visitable (valores entre 375 y casi 500 mS/cm, con media de 425 mS/cm, en el punto n° 1). Los valores medios de pH son mayores en la zona visitable (8,1 frente a 7,7).

En cuanto a la evolución estacional de la conductividad eléctrica (Fig. 2), los valores más bajos se registran desde mitad de marzo hasta principios de mayo. A partir de entonces, la conductividad incrementa su valor progresivamente hasta finales de septiembre, y desde ahí disminuye hasta diciembre, en la zona visitable, o hasta enero, al menos, en las Galerías Altas. Aunque este comportamiento general se identifica para todos los goteros, en el caso del punto n° 1 se aprecia un mínimo relativo a finales de julio acompañado de una notable variabilidad en los registros durante ese mes. En la figura 2 se aprecia también un valor relativamente alto en puntos de las Galerías Altas a principios de marzo. Este incremento local es particularmente patente en el punto n° 4 y coincide con un incremento de su caudal de goteo desde 3 a 5 cm³/min, aproximadamente.

En cuanto a variaciones interanuales en las variables consideradas, si se comparan los valores medios de conductividad y pH obtenidos en este trabajo con los obtenidos en los mismos puntos en el registro previo de 1991 a 1993 (Carrasco *et al.*, 1995), se constata, por una parte, que en las Galerías Altas la conductividad media ha aumentado (550 mS/cm frente a 475 mS/cm) y que el pH ha disminuido (7,7 frente a 8,4). Por otra parte, en la zona visitable la conductividad ha disminuido (420 mS/cm frente a 520 mS/cm) y el pH aumenta ligeramente.

Discusión

La anomalía advertida en los valores de pH y conductividad eléctrica del agua del gotero n° 3 en relación con el resto de los puntos considerados debe estar relacionada con aspectos de muestreo. Debido a su muy escaso caudal, entre 0 y 40 cm³/día, es el único cuyas características físico-químicas se medían en la siguiente jornada de muestreo, por lo que se produce la precipitación de carbonato cálcico y disminuye la conductividad al par que aumenta el pH. Esta precipitación se relaciona con la pérdida de CO₂ del agua de goteo al contactar con la atmósfera de la Cueva. Su magnitud depende, pues, de la diferencia entre las presiones parciales de dicho gas en el agua y en la cavidad.

La anterior circunstancia es identificable para el conjunto de los goteros,

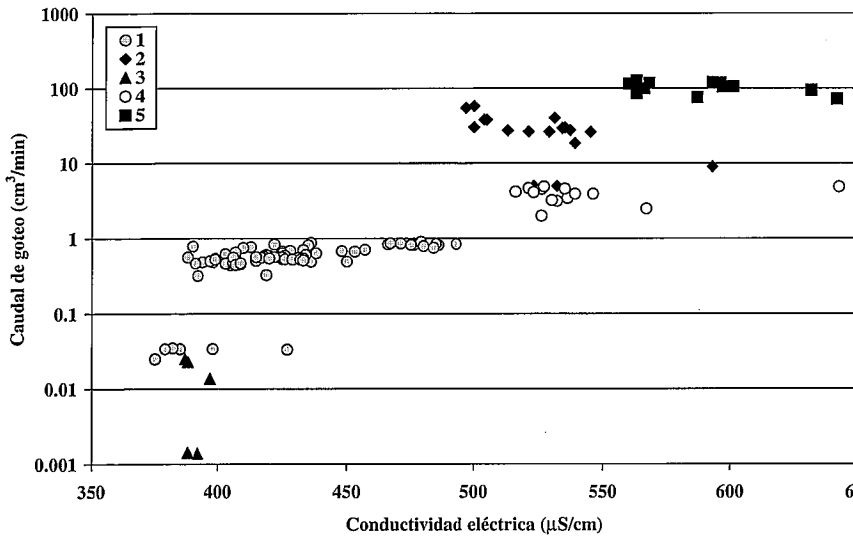


Fig. 3.- Relación entre conductividad eléctrica del agua y caudal de goteo de los puntos controlados.

Fig. 3.- Plot of drip flow versus electrical conductivity of the water in the monitored points.

como se desprende de la figura 3 en que se ha representado la relación directa entre caudal de goteo y conductividad. Así, cuanto mayor es el flujo, menor es el tiempo que demora la medida *in situ* de las variables físico-químicas y mayor la conductividad (y menor el pH) al reducirse el efecto de precipitación de carbonato.

Con la excepción del punto nº 3, los datos obtenidos en el presente estudio indican que la conductividad eléctrica es menor en la zona visitable que en las Galerías Altas. Si se admite que la presión parcial de CO₂ en el agua de infiltración es similar para ambos sectores, habría que suponer un menor contenido de dicho gas en las galerías turísticas que en la zona no visitable, hipótesis que requiere confirmación experimental.

En Carrasco *et al.* (2001) se pone claramente de manifiesto, a partir de gráficos a nivel horario, la influencia de los visitantes en las aguas de goteo, en el sentido de que el CO₂ aportado por su respiración hace disminuir la precipitación de carbonato cálcico, aumentando de esta manera la conductividad eléctrica del agua. Este mismo efecto puede invocarse para explicar las variaciones estacionales de conductividad observadas. No obstante lo anterior, en la evolución temporal de la conductividad deben incidir otros efectos, como las propias variaciones estacionales en la mineralización del agua de infiltración y en su P_{CO2}, debido a variaciones en la evapotranspiración y en el estado de la cobertura edáfica, respectivamente. También hay que tener en cuenta el grado de ventilación o renovación del aire de la cueva. Además, en relación con las variaciones de conductividad

identificadas en el punto nº 1 que no son apreciables en los otros controlados, hay que tener en cuenta que el número de medidas disponibles para ese gotero es muy superior al del conjunto de puntos en la zona no visitable.

El que los valores medios de conductividad en el punto nº 1 indiquen una tendencia decreciente respecto a los controles de 1991-1993 es un aspecto que ya ha sido puesto de manifiesto por Liñán *et al.* (1999) en un estudio más detallado. Según los resultados del presente estudio, sin embargo, la tendencia en las Galerías Altas parece ser precisamente la contraria (aumento de conductividad), lo que no sería explicable por el supuesto efecto de cantidad de precipitación que se argumenta en dicho trabajo. Seguramente se trata de una consecuencia de los distintos procedimientos de muestreo en ambos estudios, por las razones antes aducidas. Si los procedimientos hubiesen sido similares, los valores medios de conductividad en 1991-1993 habrían sido más altos y el comportamiento plurianual de dicha variable sería semejante en los dos sectores de la cueva considerados.

Conclusiones y consideraciones finales

La conductividad eléctrica media del agua medida a lo largo de buena parte del año 2000 en goteros de las Galerías Altas de la Cueva de Nerja es superior a la de la zona visitable (550 mS/cm frente a 420 mS/cm) y el pH inferior (7,7 frente a 8,1). Esta distribución es opuesta a la que resultaba de los controles en los mismos puntos entre 1991 y 1993 (Carrasco *et al.*, 1995). La razón de la discrepancia deriva de las diferen-

	Punto	C (µS/cm)	T ^a (°C)	pH
n		110	111	105
max	1	493	19,9	8,62
min		375	17,4	7,63
med		425	18,6	8,11
v (%)		7	4,7	2,38
n		18	19	18
max	2	593	21,5	7,83
min		497	20,2	7,24
med		526	20,8	7,43
v (%)		4	1,7	2,02
n		8	9	9
max	3	417	20,6	8,52
min		376	19,6	8,05
med		390	19,8	8,40
v (%)		3	1,6	1,69
n		15	15	13
max	4	642	20,9	8,41
min		516	19,6	8,18
med		540	20,1	8,34
v (%)		6	1,6	0,81
n		16	18	14
max	5	641	21,5	7,63
min		560	19,7	7,29
med		587	20,3	7,49
v (%)		4	2,4	1,46

Tabla 1.- Resumen estadístico de las variables estudiadas en cada gotero. n: nº de medidas, max: valor máximo, min: valor mínimo, med: valor medio, v: coeficiente de variación de Pearson. Los números se refieren a los puntos de goteo indicados en la Fig. 1

Table 1.- Statistical summary of the studied variables in each drip point. n: No. of data, max: maximal value, min: minimal value, med: average value, v: Pearson's variation coefficient. Numbers refer to the points indicated in Fig. 1.

cias en los procedimientos de muestreo seguidos en las Galerías Altas entre ambos controles. Así, la menor demora en la medida de estas variables en el control que aquí se presenta respecto al de 1991-1993 implica obtener valores más altos de conductividad y más bajos de pH.

La tendencia plurianual de conductividad decreciente desde 1991 en el agua de goteo de la zona visitable que se analiza en Liñán *et al.* (1999) no se constata para las Galerías Altas según las medidas de este trabajo. Esto se interpreta también como consecuencia de las diferencias en los procedimientos de muestreo.

Las variaciones estacionales en la conductividad eléctrica registradas en las aguas de goteo pueden explicarse, en general, en relación con los cambios en los contenidos de CO₂ de la atmósfera de la cueva respecto a esos mismos contenidos en el agua de infiltración. Los primeros están básicamente determinados por los flujos de visitantes y afectados por el grado de ventilación o renovación del aire en la cavidad. Los segundos dependen, entre otros factores, del estado de la cobertura vegetal en el área de recarga y del tipo de flujo a través de la zona no saturada antes de entrar en la cavidad. También influyen las propias variaciones de conductividad

del agua de infiltración por evapotranspiración en el epikarst. En cualquier caso, las medidas del contenido en CO₂ en diferentes puntos de la cueva, y no sólo en un punto de la zona visitable, como se lleva a cabo actualmente, resultan imprescindibles para explicar las diferencias que se identifican en las características físico-químicas de las aguas de goteo entre distintos sectores de la cavidad.

Agradecimientos

Este trabajo constituye una contribución al Proyecto IGCP 448 de la UNESCO. Nuestro agradecimiento al Patronato de la Cueva de Nerja por la subvención concedida y las facilidades para

realizar la investigación. La colaboración de uno de los autores (J.B.H.) se enmarca también en el Proyecto HID98-0983 del Plan Nacional de I+D (DGICYT).

Referencias

- Andreo, B. y Carrasco, F. (1993): *Geología de la Cueva de Nerja. Trabajos sobre la Cueva de Nerja* (Carrasco, F., ed.), 299-328.
- Cardenal, J., Benavente, J., Andreo, B. y Carrasco, F. (1999a): *Contribución del estudio científico de cavidades kársticas al conocimiento geológico* (Andreo, B., Carrasco, F. y Durán, J.J., eds.), 403-411.
- Cardenal, J., Benavente, J., Andreo, B. y

- Carrasco, F. (1999b): *Geogaceta*, 25, 63-65.
- Carrasco, F. y Andreo, B. (1993): *Geogaceta*, 14, 9-12.
- Carrasco, F., Andreo, B., Benavente, J. y Vadillo, I. (1995): *Cave and Karst Science*, 21, 27-32.
- Carrasco, F., Liñán, C., Andreo, B. y Vadillo, I. (2001): *Estudio hidrogeoquímico de las aguas de infiltración en la cueva de Nerja y de las aguas de su entorno hidrogeológico. Año 2000*. (Informe interno, Patronato Cueva de Nerja).
- Liñán, C., Andreo, B., Carrasco, F. y Vadillo, I. (1999): *Contribución del estudio científico de cavidades kársticas al conocimiento geológico* (Andreo, B., Carrasco, F. y Durán, J.J., eds.), 393-402.