

Distribución vertical del contenido en CO₂ en la zona no saturada de un karst mediterráneo (Nerja, España): resultados preliminares

Vertical distribution of CO₂ content in the unsaturated zone of a mediterranean karst (Nerja, Spain): preliminary results

J. Benavente ⁽¹⁾, I. Vadillo ⁽²⁾, F. Carrasco ⁽²⁾ y C. Liñán ⁽³⁾

⁽¹⁾ Instituto del Agua, Universidad de Granada, c/ Ramón y Cajal, nº 4, Edif. Fray Luis de Granada, 18071 Granada, España. jbenaven@ugr.es

⁽²⁾ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29071 Málaga. vadillo@uma.es, fcarrasco@uma.es

⁽³⁾ Fundación Cueva de Nerja. Carretera de Maro s/n. 29787 Nerja (Málaga). cbaena@cuevanerja.com

ABSTRACT

Nine boreholes are located in a experimental site in the surroundings of Nerja Cave (Málaga). CO₂ concentration, relative humidity and temperature logs have been made at the beginning of July, 2006. The same parameters were recorded during a period of several days at different depths. The research concerns the first 40 m of the unsaturated zone of a karstic aquifer developed in marbles of Triassic age. All CO₂ concentrations increase in depth, with maximum values of 60.000 ppm, and are linked to temperatures and relative humidities between 20-23 °C and 80-100 %, respectively. These conditions seem to be very stable at the studied depths, but at the surface frequent changes are observed, always associated to upcoming and downcoming CO₂ air fluxes. Boreholes that have crossed cavities show more variations in the gas content. Either the origin of CO₂ or air fluxes dynamics are being studied for a seasonal characterization.

Key words: Soil CO₂, Unsaturated zone, Well monitoring, Air fluxes, Karst, Nerja.

Geogaceta, 41 (2007), 23-26
ISSN: 0213683X

Introducción

Los procesos de disolución y de exhalación de CO₂ en la zona no saturada de acuíferos carbonáticos son básicos en los estudios sobre génesis y evolución de formas kársticas. Sin embargo, los datos experimentales sobre contenidos de ese gas en tales ámbitos son relativamente escasos (Selker *et al.*, 1999).

En el caso del karst de Nerja (Málaga), concretamente en el entorno de la cueva del mismo nombre, se vienen efectuando desde 2003 medidas de concentración de CO₂ y de temperatura del aire en una red de control establecida al efecto. Esta red incluye, por una parte, dispositivos adaptados a medir esas variables en la reducida franja edáfica. Así se han medido valores de concentración de CO₂ entre algunos centenares y varios miles de ppm, valores estos últimos encontrados a finales de primavera (Benavente *et al.*, 2006a). Por otra parte, se han efectuado medidas en sondeos y se han registrado variaciones muy importantes en cada punto, con mínimos del orden de los valores atmosféricos (300-400 ppm) y máximos superiores a 10.000 ppm, así como flujos ascendentes y descendentes

claramente perceptibles (Benavente *et al.*, 2006b).

Sin embargo, el instrumento utilizado para medir la concentración de CO₂ no permitía registrar por encima del citado valor

máximo, ni tampoco fue posible adaptarlo para descender por debajo de 1 m de profundidad en los sondeos, lo que limitaba el alcance de las interpretaciones. Afortunadamente, en una fase más reciente de los con-

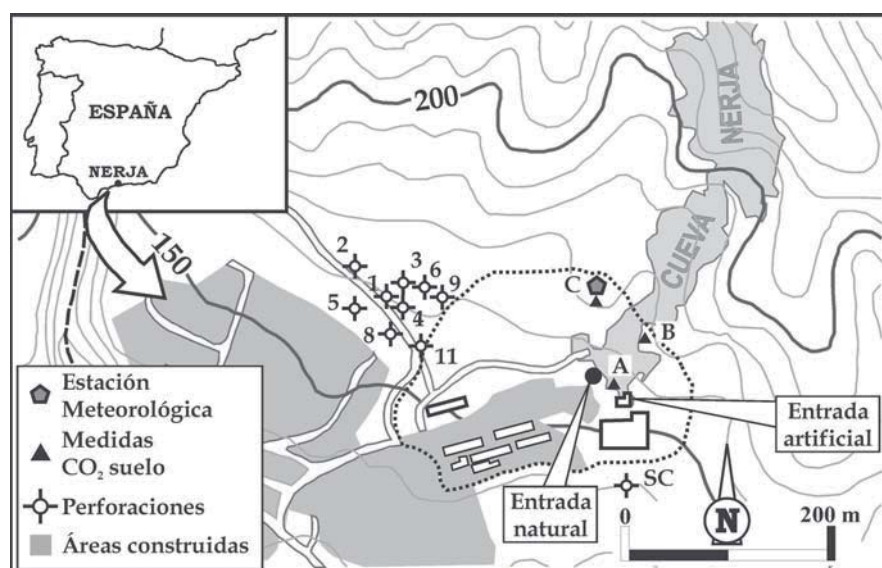


Fig. 1.- Localización geográfica y esquema del área de estudio. Los números de las perforaciones corresponden a las referencias S1, S2, etc. usadas en el texto.

Fig. 1.- Geographical situation and sketch of the study area. The number of the boreholes corresponds to the references S1, S2, etc., used in the text.

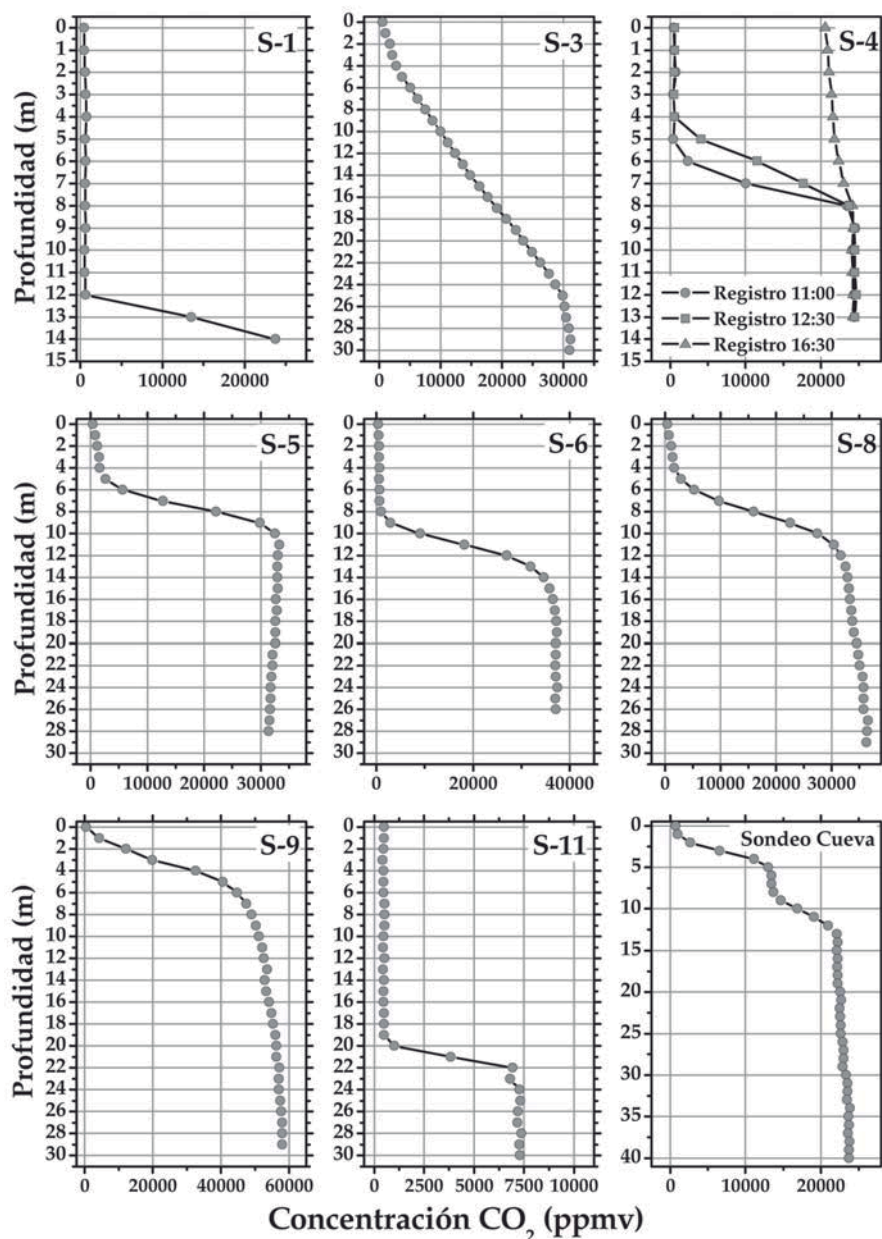


Fig. 2.- Registros de la concentración de CO₂ de la zona no saturada en las nueve perforaciones estudiadas.

Fig. 2.- CO₂ concentration of the unsaturated zone in the nine studied boreholes.

troles se ha podido disponer de un equipo que permite registrar valores que superan ampliamente el mencionado límite. También ha sido posible descender el instrumento hasta profundidades del orden de 40 m dentro de los sondeos y efectuar registros seriados en el tiempo. El nuevo equipo permite, además, la medida de la humedad relativa del aire. Por último, se han incorporado a la red de control tres nuevas perforaciones: los puntos 6, 9 y SC de la figura 1. Los dos primeros son sondeos de reconocimiento de características constructivas similares al resto de los puntos previamente controlados. El punto SC es un sondeo de captación que fue usado en las instalaciones de la cueva de Nerja.

Estos cambios de instrumentación, dispositivos de medida e infraestructura de control están generando una información experimental más abundante y representativa que la que existía previamente sobre las características de la fase gaseosa que ocupa la zona no saturada del karst de Nerja. El presente trabajo presenta un resumen de los nuevos datos obtenidos a lo largo del verano de 2006.

Dispositivo experimental

La infraestructura de observación del presente estudio se localiza unos 250 m al oeste de la entrada de la Cueva de Nerja y está basada en diez perforaciones (Fig. 1).

Nueve de ellas, designadas por números, son sondeos piezométricos realizados por el SGOP (Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Medio Ambiente). La restante es un sondeo de captación, actualmente inactivo. Los sondeos se encuentran agrupados dentro de una parcela de aproximadamente 100 m², situada en una zona de pinar poco denso y matorral, a ambos lados de un camino forestal que se adentra en terrenos del Parque Natural de las Sierras de Tejada, Almijara y Alhama. La altitud de esta parcela es aproximadamente similar a la de la entrada a la cavidad, unos 160 m s.n.m.

Uno de los sondeos piezométricos, el S2, es relativamente profundo ya que alcanza 380 m y presenta nivel de agua permanente a unos 100 m. El emboquille de este sondeo, sin embargo, no hace posible la introducción del instrumento de medida. La profundidad del resto de los sondeos piezométricos es de 14 m (sondeos 1 y 4), 30 m (sondeos 3, 5, 6, 8 y 9) y 40 m (sondeo 11); ninguno registra nivel de agua de forma permanente. Los seis metros superiores de los sondeos están entubados con tubería metálica ciega de 127 mm de diámetro. El resto de la columna corresponde al diámetro de perforación: 100 mm o 116 mm, según los casos. El sondeo de captación SC tiene una profundidad de 165 m y presenta nivel de agua a unos 90 m de profundidad.

Es de resaltar que en los sondeos 1, 4 y 11 se cortaron cavidades dentro del espesor de mármoles atravesado. Estas discontinuidades representan una fracción considerable de la longitud de la columna perforada en los sondeos 4 y 11 (del orden del 60 % y del 40 %, respectivamente, de la longitud total).

El dispositivo de medida y registro de las concentraciones de CO₂ en el aire consistió en un equipo MI70 y un sensor de CO₂ GMP221 de la marca VAISALA que calcula la concentración de CO₂ en el aire a partir de la absorción de luz infrarroja por este gas. El rango óptimo de medida del sensor utilizado para esta investigación cubre los valores desde 0 a 50.000 ppm.

Los registros de concentración de CO₂ en la vertical de las perforaciones se realizaron los días 4 y 7 de Julio de 2006. En el punto SC se instaló el dispositivo a profundidades fijas de 0, 1, 5, 10 y 20 metros entre los días 11 y 18 de julio de 2006.

Resultados

En la figura 2 se representan gráficamente los resultados de los registros verticales de concentración de CO₂. En la tabla 1 se presenta un resumen estadístico de los valores obtenidos en tales registros.

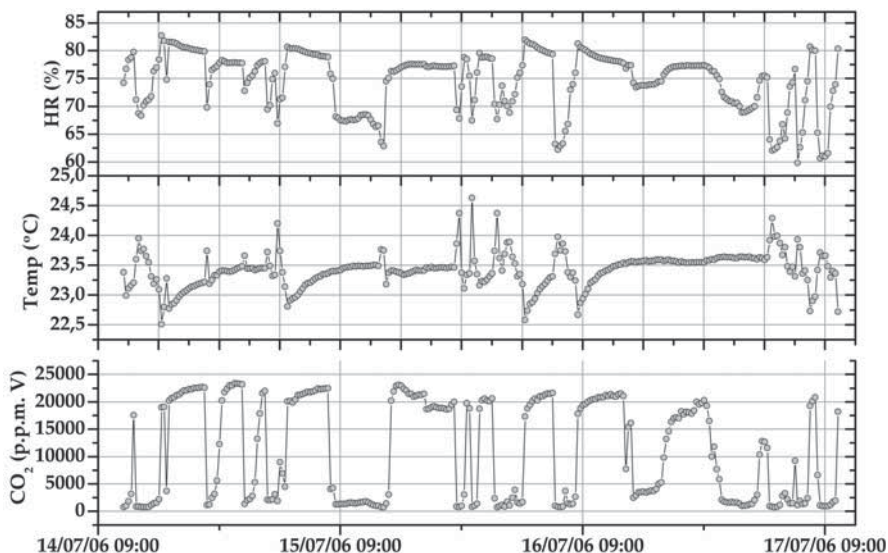


Fig. 3.- Registros temporales de CO₂, humedad relativa (HR) y temperatura (Temp) a una profundidad de 1 metro en el sondeo desinstalado de la Cueva de Nerja (SC en Figura 1).

Fig. 3.- Recorded values of CO₂, relative humidity (HR) and temperature (Temp) at one meter in the Nerja Cave uninstalled well (SC in Figure 1).

asociados a temperaturas entre 23 °C y 33 °C, según las horas y fechas de las medidas, y valores de humedad relativa generalmente entre el 30 % y el 50 %.

En el gráfico del punto S4 (Fig. 2) se incluyen los resultados de tres registros realizados en horas diferentes dentro de la misma jornada. Los dos realizados a mitad de la mañana son muy similares, con un marcado escalón que coincide con el techo de una cavidad, pero el realizado a primeras horas de la tarde indica una homogeneización prácticamente completa a lo largo de toda la columna, con valores de contenido de CO₂ entre 20.000 y 25.000 ppm, de temperatura entre 22 °C y 24 °C y de humedad relativa entre 70 % y 90 %.

En la figura 3 se representan las variaciones de las tres variables controladas a lo largo de tres días a un metro de profundidad en el punto SC. Son patentes las importantes fluctuaciones en el contenido de CO₂ (entre valores atmosféricos y máximos en torno a 23.000 ppm) que van acompañadas de cambios en la humedad relativa en el sentido antes descrito. La temperatura también experimenta cambios, aunque más suavizados.

Aunque no se incluyen figuras al respecto, se han efectuado registros similares en el mismo punto a diferentes profundidades. Así, en la boca del sondeo el rango de variación del CO₂ es semejante al de la figura 3. La humedad relativa es del orden del 60 % y la temperatura oscila generalmente entre 26 °C y 28 °C. A 5 m apenas se identifican fluctuaciones en las tres variables, manteniéndose valores alrededor de 22.000-25.000 ppm, 95-100 % y 20 °C, respectivamente. La homogeneidad en los datos se incrementa a medida que descendemos a 10 m y 20 m, con escasas variaciones respecto de los siguientes valores: 27.000 ppm, 100 % y 21 °C, respectivamente.

Discusión

La forma general de los perfiles, que indica concentración de CO₂ creciente con la

De la figura 2 se desprende, en primer lugar, que en todos los sondeos se produce un incremento general en la concentración de CO₂ con la profundidad. Esta tendencia sólo se manifiesta de una manera gradual en el sondeo 3 y, menos claramente, en el 9. Lo usual es que existan cambios bruscos a determinadas profundidades, a manera de escalones en los gráficos. En los puntos S1, S4 y S11 la profundidad de tales escalones coincide bastante aceptablemente con el techo de cavidades. En el sondeo de la Cueva se aprecian dos escalones, aunque en este caso no se dispone de un parte fiable de la columna atravesada que permita ilustrar sobre tal circunstancia.

Tanto de los gráficos de la figura 2 como de los valores de la tabla 1 se desprende que los valores mínimos de concentración medidos en cada punto están aproximadamente entre 400 y 500 ppm, salvo en el SC que es 730 ppm. El valor máximo, próximo a 60.000 ppm, se mide en el S9. En el resto de los puntos el valor máximo está comprendido entre 20.000 y 40.000 ppm, salvo en el S11 que es ligeramente superior a 7.000 ppm. En cuanto a valores medios, el S9 registra el valor más elevado (unos 47.000 ppm), mientras que los más bajos, inferiores a 3.000 ppm, los ofrecen el S1 y el S11; el resto están en el rango de 20.000 a 30.000 ppm. Los puntos S1, S11 y S4 son los que presentan mayor variabilidad en las medidas (tabla 1).

Los registros de los puntos S1 y S9 en la figura 2 pueden destacarse en tanto que parecen caracterizar comportamientos netamente diferentes. En el S1 se miden valores prácticamente atmosféricos hasta los 12 m de pro-

fundidad. A partir de ahí, y coincidiendo con el inicio de una cavidad, se incrementa la concentración hasta más de 20.000 ppm. En el S9, a lo largo de los primeros cinco metros se produce un rápido incremento en los contenidos de CO₂, alcanzándose valores superiores a 50.000 ppm. Luego hay un crecimiento suave en los 25 m siguientes hasta llegar a casi 60.000 ppm.

Si, además del contenido en CO₂, se consideran los valores de las otras dos variables medidas en los registros y se analizan sus relaciones mutuas, se advierte que la relación entre la humedad relativa y la temperatura es de tipo inverso, al igual que entre temperatura y contenido de CO₂, mientras que la relación entre esta última variable y la humedad relativa es de tipo directo. Así, las concentraciones mayores del gas van asociadas a los valores más bajos de temperatura medidos, entre 21 °C y 23 °C, y los máximos de humedad relativa, entre el 80 % y el 100 %. En cuanto a los contenidos mínimos de CO₂, van

	S1	S3	S4 11:00	S4 12:30	S4 16:30	S5	S6	S8	S9	S11	SC
N	15	31	14	14	14	29	27	30	30	31	41
Rango	23.320	30.680	24.190	3.770	24.210	32.870	37.040	36.200	57.660	6.940	23.120
Max	23.740	31.160	24.600	24.310	24.710	33.270	37.460	36.590	58.060	7.360	23.850
Min	420	480	410	20.540	500	400	420	390	400	420	730
Media	2.975	16.517	11.509	22.724	13.036	23.929	21.261	24.733	46.991	2.557	19.277
Des. Est.	6.640	10.802	11.722	1.481	11.296	13.243	17.114	14.140	16.346	3.067	6.598
V (%)	223	65	102	7	87	55	80	57	35	120	34

Tabla I.- Tabla estadística de los valores de CO₂ durante las campañas de muestreo. Leyenda, N: número de valores, Max: valor máximo registrado, Min: valor mínimo registrado, Des.Est.: desviación estandar, V(%): Coeficiente de variación.

Table I.- Statistical table of CO₂ values during the sampling campaigns. Legend, N: number of values, Max: maximum registered values, Min: minimum registered value, Des.Est.: Standard deviation, V(%): Variation coefficient.

profundidad en la zona no saturada, es coherente con los relativamente escasos datos experimentales al respecto (Selker *et al.*, 1999).

El valor máximo obtenido, de casi 60.000 ppm, parece una cifra muy elevada para un origen exclusivamente epigénico, máxime si se tiene en cuenta el clima mediterráneo con tendencia semiárida del área y el escaso desarrollo de la vegetación y de la cobertera edáfica.

En el trabajo de Benavente *et al.* (2006b) se esbozan hipótesis explicativas de esta supuesta anomalía, como la oxidación de la materia orgánica, tanto de origen natural como antrópico, o los aportes profundos a través de un importante accidente neotectónico muy próximo a la zona de estudio. La cuestión no está resuelta, y en la actualidad se intenta discernir entre esas hipótesis a partir del análisis isotópico ($d^{13}C_{CO_2}$) de muestras de aire del interior de los sondeos, entre otras técnicas.

Los valores mínimos de CO_2 son típicamente atmosféricos y corresponden a medidas efectuadas en la boca de los sondeos. El valor relativamente alto medido en la boca del punto SC obedece a que es el único que está alojado dentro de una caseta con ventilación limitada. Cuando los valores similares a los atmosféricos se siguen hasta una cierta profundidad dentro de las perforaciones, como se percibe claramente en los puntos S1, S4, S6 y S11, deben corresponder a un flujo descendente desde la superficie hasta que se encuentra una atmósfera interior con contenidos de CO_2 sensiblemente superiores. Precisamente tres de estos cuatro sondeos cortan cavidades más o menos desarrolladas y es al nivel del techo de estas estructuras donde se concentran los cambios en los contenidos del gas.

En el mencionado trabajo de Benavente *et al.* (2006b) se planteaba también que: (a) en general los contenidos más elevados de CO_2 , que suelen ir asociados a flujos ascendentes de aire con temperatura algo superior a la ambiental, se registraban en otoño-invierno y los más bajos en verano; (b) que existían variaciones diarias en puntos concretos cuyo rango superaba los 10.000 ppm, y (c) que los sondeos con concentración de CO_2 más alta eran los que atravesaban más cavidades (S4 y S11).

En relación con lo anterior, la circunstancia (a) no puede ser comprobada hasta que no se disponga de datos obtenidos en otoño-invierno con la nueva instrumentación. No obstante, la consecuencia de flujos ascendentes que imponen valores elevados de CO_2 a lo largo de toda la columna del sondeo ha podido ser comprobada en los puntos S4 y SC (Fig. 2 y Fig. 3). La circunstancia (b) se ha confirmado igualmente a tenor de lo medido a lo largo de distintas horas del día

en estos dos puntos. En cuanto a lo expuesto en (c), los presentes resultados apuntan precisamente al comportamiento opuesto. De hecho, lo que los datos obtenidos en las fechas de este trabajo indican es que en estos puntos que atraviesan cavidades el coeficiente de variación de las variables controladas es mayor y que, además, los cambios tienden a producirse a nivel del techo de tales cavidades. Ello sugiere una dinámica de flujos de aire más activa en relación con las cavidades, en el sentido de favorecerse que el aire exterior penetre dentro de ellas y haga que los contenidos medios de CO_2 que se obtengan sean más bajos que en los sondeos que no atraviesan cavidades.

No disponemos de datos respecto a conexiones entre las cavidades atravesadas por los sondeos y la cercana cueva de Nerja. En el interior de esta importante cavidad turística es conocida la concentración de CO_2 y su variación estacional (Carrasco *et al.*, 1999) y se estima un valor medio entre aproximadamente 600 y 750 ppm según sectores, con máximos diarios en Agosto de algo más de 2.300 ppm y mínimos equivalentes a valores típicos atmosféricos en invierno. Parece lógico pensar que en la franja de terreno que hay sobre la cueva, cuyo espesor puede ser de algunas decenas de metros, deba producirse una distribución del contenido en CO_2 similar a la observada en la red de control, aunque seguramente el gran volumen de la cavidad unido a su grado de ventilación natural hacen inapreciable el efecto de los flujos de aire procedente de la zona no saturada hacia el interior de la cavidad.

Conclusiones

Es conocido por trabajos previos que en mayo se localiza el máximo de concentración de CO_2 , con valores del orden de varios miles de ppm, en la superficie de los afloramientos de mármoles en los que se desarrolla el karst de Nerja. Este aire, relativamente pesado, debe descender por las fisuras, conductos y cavidades de la zona no saturada.

El presente trabajo pone de manifiesto, a partir de registros verticales realizados en julio de 2006 en nueve sondeos de una parcela experimental, que a profundidades entre 15 y 40 m en la zona no saturada se alcanzan contenidos de CO_2 que están generalmente en el rango de 20.000 a 40.000 ppm, con máximos de casi 60.000 ppm, asociados a los cuales se han medido también valores muy altos de humedad relativa (80 %-100 %) y temperaturas entre 20 y 23 °C, lo cual contrasta grandemente con los valores típicos de estas variables en la atmósfera exterior en esas fechas: 400-500 ppm, 30-50 % y 26-29 °C.

No se ha establecido aun con base científica el origen de esa elevada concentración

de CO_2 , cuya trascendencia a efectos hidroquímicos es evidente.

La masa de aire cargado de CO_2 presenta contenidos de gas crecientes con la profundidad. El incremento es particularmente discontinuo en los sondeos que atraviesan cavidades. En tales casos la variabilidad de los datos de concentración es mayor, lo que responde al hecho de que la perforación actúa en ocasiones exhalando hacia fuera aire interior húmedo y relativamente frío y cargado de CO_2 y otras veces introduce hacia dentro aire exterior. Las inversiones de flujo son más frecuentes a menor profundidad, donde se producen repetidas veces en un mismo día.

Este comportamiento está pendiente de estudio, aunque parece lógico que, entre otros factores, haya influencia de los contrastes térmicos entre la masa de aire interior, de temperatura bastante constante, y la de la atmósfera exterior, caracterizada por variaciones térmicas diarias y estacionales importantes, circunstancia, por lo demás, sobradamente conocida en terrenos kársticos. Este condicionamiento justificaría también el predominio en otoño-invierno de flujos ascendentes con temperatura algo superior a la ambiental, lo que ha sido apuntado por los autores a partir de trabajos previos en la parcela. En cualquier caso, resulta obligado mantener controles como los aquí presentados a lo largo de las otras tres estaciones del año para tratar de despejar las numerosas cuestiones planteadas.

Agradecimientos

Investigación financiada por la Fundación Pública de Servicios Cueva de Nerja («Estudio de la génesis actual de espeleotemas en la Cueva de Nerja»). La presente publicación constituye también una contribución al Proyecto 513 del PIGC de la UNESCO.

Referencias

- Benavente, J., El-Mabrouki, K., Molina, J.L., Vadillo, I., Liñán, C., Simón, M. y Carrasco, F. (2006a). *Geogaceta*, 39, 95-98.
- Benavente, J., Vadillo, I., El-Mabrouki, K., Carrasco, F., Molina, J.L., Liñán, C. y Simón, M. (2006b). *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, 18, 349-356.
- Carrasco, F., Andreo, B., Vadillo, I., Durán J.J. y Liñán, C. (1999). En: *Contribución del estudio científico de las cavidades Kársticas al conocimiento geológico* (B. Andreo, F. Carrasco y J.J. Durán, Eds.). Patronato de la Cueva de Nerja. 323-334.
- Selker, J.S., Keller, C.K. y McCord, J.T. (1999). *Vadose Zone Processes*. CRC Press. 339 p.