

Control de parámetros ambientales en las Galerías Altas y Nuevas de la Cueva de Nerja (Málaga). Resultados preliminares

Liñán Baena, Cristina ^(1,2), Carrasco Cantos, Francisco ^(1,2), Calaforra Chordi, José María ^(1,3), del Rosal Padial, Yolanda ⁽¹⁾, Garrido Luque, Antonio ⁽¹⁾ y Vadillo Pérez, Iñaki ⁽²⁾.

(1) Fundación Cueva de Nerja. Instituto de Investigación. C/ Carretera de Maro s/n, 29787-Nerja (Málaga). cbaena@cuevanerja.com, yolanda@cuevanerja.com, agarrido@cuevanerja.com.

(2) Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Campus de Teatinos s/n, 29071- Málaga. fcarrasco@uma.es; vadillo@uma.es.

(3) Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Departamento de Hidrogeología y Química Analítica. Universidad de Almería. Carretera Sacramento s/n, 04120-Almería. jmcalaforra@ual.es.

Resumen

La Cueva de Nerja, ubicada en el sector oriental de la provincia de Málaga, es una de las cavidades kársticas más significativas de Andalucía, en la que confluyen importantes valores científicos y culturales. Aproximadamente un tercio del volumen total de la cueva, las denominadas Galerías Turísticas, está habilitado y abierto al público desde 1960, un año después de su descubrimiento. El sector habilitado dispone de una completa red de control medioambiental desde 1993, integrada por distintos sensores que miden, en continuo, los principales parámetros del medio subterráneo. El análisis de la amplia serie de datos ambientales existente ha permitido obtener una valiosa información sobre las variaciones naturales de los diferentes parámetros controlados así como sobre la influencia antrópica en este sector de la cueva.

En las Galerías Altas y Nuevas, que conforman el sector no habilitado, no existe una serie continua de datos ambientales, limitándose éstos a medidas de carácter puntual realizadas con equipos portátiles. En 2006 y 2007, como primer paso en el control de este sector de la cavidad, se procedió a la instalación de tres sensores para registrar, en continuo, la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO₂ del aire. Los resultados preliminares, obtenidos tras el análisis de los datos medioambientales registrados por estos equipos, indican la existencia de un gradiente higrotérmico y de CO₂ en la cavidad, aumentando la temperatura y la humedad relativa del aire hacia las salas más internas de la misma y disminuyendo la concentración de CO₂. En épocas invernales de alta visitabilidad se detecta la llegada de CO₂ de origen antrópico, procedente del sector turístico de la cavidad, hasta el sector no habilitado.

Palabras clave: Cueva de Nerja, galerías no turísticas, monitorización, parámetros ambientales.

Abstract

Nerja Cave is located in the Eastern sector of the Málaga province. It is one of the most important karstic caves in Andalusia with outstanding scientific and cultural characteristics. Almost one-third of the total volume of the cave, the so-called "Show Galleries", are open to the public since 1970, one year after the cave was discovered. In this part, since 1993, a net of environmental sensors record the main underground atmospheric parameters. The analysis of this information provides a valuable tool concerning the natural variation of environmental parameters, as well as the human influence in this sector of the cave.

In the Upper and New galleries, that are part of the non-visited sector, there is no a continuous monitoring of environmental parameters and the record of these data is restricted to punctual campaigns with portable sensors. In 2006 and 2007, as a first step in the environmental control of this sector of the cave, three permanent sensors (temperature of the air, relative humidity and concentration of CO₂) were installed. The preliminary results, obtained after the analysis of the environmental data registered by these sensors, indicate the existence of a hydrotermic gradient and of CO₂ in the cavity, increasing the temperature and the relative humidity of the air towards the most internal halls of the cave and diminishing the CO₂ concentration. At winter periods of high visitability the anthropic CO₂ arrival, coming from the tourist sector of the cavity until the non-visited sector, is detected.

Key words: Nerja Cave, non- touristic galleries, monitoring, environmental parameters.

Introducción

La Cueva de Nerja está situada en el sector oriental de la provincia de Málaga, unos cinco kilómetros al este del pueblo costero de Nerja, sobre la vertiente meridional de Sierra Almirajara. La cavidad tiene tres bocas de acceso, dos torcas subcirculares ubicadas a 161 y 162 m s.n.m y una entrada más amplia, a cota 158 m s.n.m., habilitada para la visita turística. Su desarrollo es prácticamente horizontal, entre las cotas 123 y 191 m s.n.m. (S.E.M., 1985), y en ella se distinguen dos sectores (Fig. 1): una zona habilitada para el turismo (Galerías Turísticas), que ocupa aproximadamente un tercio del volumen total de la cueva (que es del orden de los 300.000 m³) y una zona no habilitada (Galerías Altas y Nuevas), que sólo recibe visitas ocasionales de investigadores y grupos reducidos de espeleoturistas.

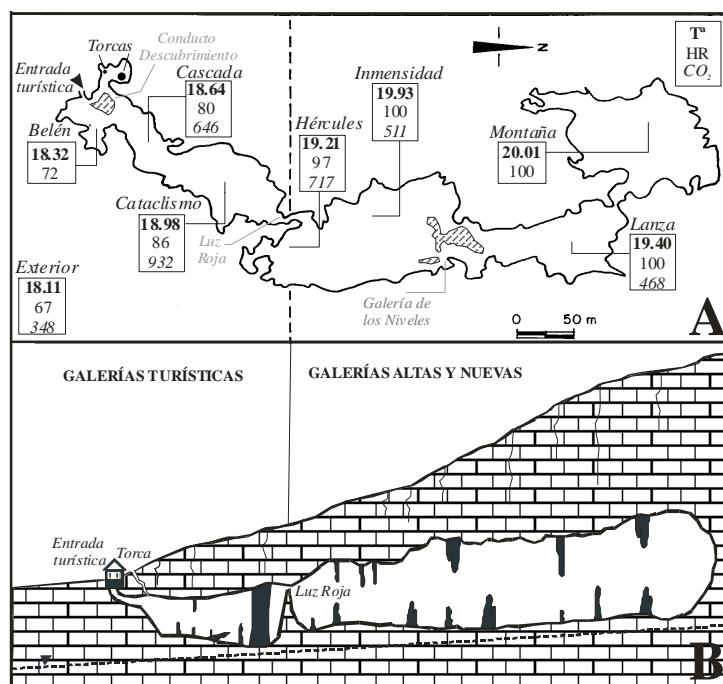


Fig. 1. (A) Media de los valores diarios de temperatura (°C), humedad relativa (%) y concentración de CO₂ del aire (ppm), medidos en el exterior y en el interior de la Cueva de Nerja (B) sección transversal de la cavidad (no está a escala).

La cueva se desarrolla en mármoles dolomíticos triásicos de la unidad alpujarride de Almjara (Andreo *et al.*, 1993). Los mármoles, muy diaclasados y con una potencia de hasta 500 metros, son permeables por fracturación y karstificación y constituyen el acuífero de la vertiente meridional de Sierra Almjara (I.G.M.E., 1983; Pérez y Andreo, 2007). En la actualidad, la cueva está situada en la zona no saturada del acuífero, varios metros por encima del nivel piezométrico. Sobre la cavidad, el espesor del epikarst y la zona no saturada es muy variable: de 4 a 50 metros en las Galerías Turísticas y mayor de 90 metros en las zonas más internas de la cueva.

La Cueva de Nerja es uno de los principales atractivos turísticos de la Costa del Sol oriental y recibe una media de 500.000 visitantes anuales. Está catalogada como Bien de Interés Cultural (1985) con categoría de Zona Arqueológica (2005) y destaca, además, por su extraordinario patrimonio natural. Desde 1993, una completa red de monitorización controla, en continuo, los principales parámetros ambientales del medio ambiente subterráneo, esencialmente los de las Galerías Turísticas (Liñán *et al.*, 2004). En las Galerías Altas y Nuevas la información ambiental es, sin embargo, más escasa.

Parámetros ambientales en el sector no habilitado. Principales antecedentes.

Los primeros datos climáticos de las Galerías Altas y Nuevas fueron publicados por el Grupo de Espeleología de Málaga (G.E.M.A., 1977) tras realizar una campaña de medidas mediante psicrómetros y termómetros de mercurio, a lo largo de seis meses. Según el G.E.M.A., en las Galerías no visitables se produce un notable incremento de la humedad relativa y un descenso de la temperatura del aire y de la roca, una estabilización de la humedad del aire desde la Sala de la Lanza hasta el fondo de la cavidad en valores muy próximos al 99.5 % y una disminución de la temperatura del aire en la Sala de las Columnas de Hércules y en la Galería de los Niveles debido a la acumulación de aire frío y denso en estos sectores, más bajos desde el punto de vista topográfico.

El Grupo de Exploraciones Subterráneas (G.E.S.) de la Sociedad Excursionista de Málaga realizó una nueva campaña de medidas climáticas desde noviembre de 1979 hasta febrero de 1981. Entre otros resultados señalaron que “la temperatura de la cavidad es elevada, sobre todo en la zona de las Columnas de Hércules, apenas existe estratificación térmica y la temperatura de la roca oscila entre 18.5 °C en la Galería de los Niveles y 17.5 °C en la Sala de la Montaña” (S.E.M., 1985).

Hoyos (1989) aportó nuevos datos de temperatura y concentración de CO₂ en la Sala de las Columnas de Hércules, adyacente a la zona visitable, obtenidos mediante un sistema de registro continuo. Según este autor, la temperatura en dicha sala es del orden de 19 °C en verano y entre 19 y 20 °C en invierno; el contenido en CO₂ del aire varía entre 520 y 1000 ppm en verano y entre 400 y 450 ppm en invierno. También señala cómo, a partir del sector de conexión entre las Galerías Turísticas y las no habilitadas, las oscilaciones diarias de la temperatura se amortiguan mucho, sobre todo en verano. Un aspecto destacable señalado por este investigador es que “la influencia de los visitantes se llega a notar en la zona externa de las Galerías no visitables”.

En el marco de su investigación sobre la ventilación de la Cueva de Nerja, Cañete (1997) midió la concentración de CO₂ del aire en la Sala de las Columnas de Hércules. Los muestreos fueron realizados con diversa periodicidad, entre febrero de 1992 y junio de 1995 y el aire analizado mediante cromatografía de gases. Los valores de CO₂ obtenidos estuvieron comprendidos entre 284 y 1768 ppm, con un valor medio para el período de control de 637 ppm y un coeficiente de variación del 44 %.

En diciembre de 1999, el Instituto de Investigación Cueva de Nerja (I.I.C.N.) instaló dos sensores, marca TESTO, en las salas de Inmensidad y Montaña para medir, con periodicidad horaria, la temperatura y la humedad relativa del aire. Dichos equipos estuvieron funcionando hasta septiembre del año 2000. En 2003, un sensor TESTO estuvo midiendo la velocidad del viento y la temperatura del aire en el sector conocido como *Luz Roja*, única zona practicable que comunica las Galerías Turísticas y el sector no habilitado (Fig. 1). Los últimos equipos instalados en las Galerías Altas y Nuevas (finales de 2006-principios de 2007) han sido tres sensores VAISALA de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ del aire, ubicados actualmente en las salas de Columnas de Hércules, Inmensidad y Lanza.

El objetivo de la presente comunicación es mostrar la información ambiental adquirida por el I.I.C.N. en las Galerías Altas y Nuevas de la Cueva de Nerja. Aunque, hasta la fecha, la serie de datos disponible no es demasiado larga y es discontinua en el tiempo, su análisis aporta información de interés sobre los parámetros climáticos de la cueva y sobre la influencia de la visita turística en la cavidad.

Resultados preliminares obtenidos en las Galerías Altas y Nuevas

Temperatura del aire

En la Cueva de Nerja se constata la existencia de un gradiente térmico general, según el cual la temperatura media del aire se incrementa al aumentar la distancia a las entradas de la cavidad (Fig. 1A, Tabla 1). Así, en las Galerías Turísticas, la temperatura media del aire está comprendida entre 18,32 y 18,98 °C mientras que, en el sector no habilitado, la temperatura media del aire está comprendida, durante el período de investigación, entre 19,21 y 20,01 °C (Tabla 1). El valor medio de la temperatura del aire en las Galerías Altas y Nuevas (19,64 °C) supera casi en un grado centígrado el valor medio de temperatura del aire del sector turístico (18,65 °C).

En la zona no habilitada, la mayor temperatura del aire, 20,01 °C de valor medio, se registra en la Sala de la Montaña, la más alejada de las entradas de la cueva y ubicada bajo un mayor espesor de roca (Fig. 1B), mientras que la temperatura media más baja corresponde a la Sala de las Columnas de Hércules. La temperatura de la Sala de la Lanza es inferior a la de la Sala de la Inmensidad, distorsionando ligeramente el gradiente general observado en el resto de la cavidad. En todas las salas controladas, los coeficientes de variación de la temperatura del aire son muy bajos, entre 0,10 y 0,67 %, y decrecen hacia las salas más interiores (Tabla 1).

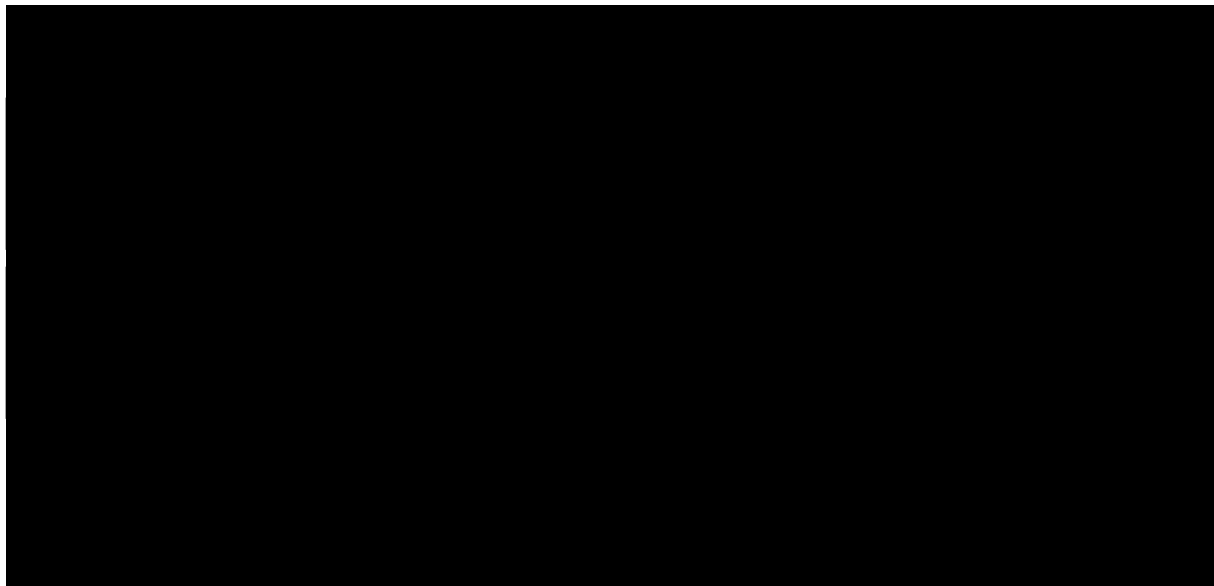


Tabla 1. Valores medios de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ del aire en el exterior y en el interior de la Cueva de Nerja, calculados a partir de datos horarios del período diciembre 1999/marzo 2000 a septiembre 2000 (sensores TESTO) y agosto 2006 a junio 2008 (sensores VAISALA).

A escala mensual (Fig. 2), se constata que la temperatura en el exterior es mayor que la temperatura del aire de todas las salas de la cueva durante los meses de junio a septiembre. Por el contrario, desde noviembre hasta abril, la temperatura del interior de la cavidad es superior a la temperatura del aire exterior. En mayo, la temperatura exterior es superior a la temperatura de las salas de Belén y Cascada, pero inferior a la del resto de salas de la cavidad mientras que, en octubre, prácticamente no hay diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de la cueva (la del interior es ligeramente inferior a la del exterior, salvo en la Sala de la Inmensidad). La mayor diferencia entre las temperaturas de las diferentes salas estudiadas se produce en invierno y en primavera (Fig. 2).

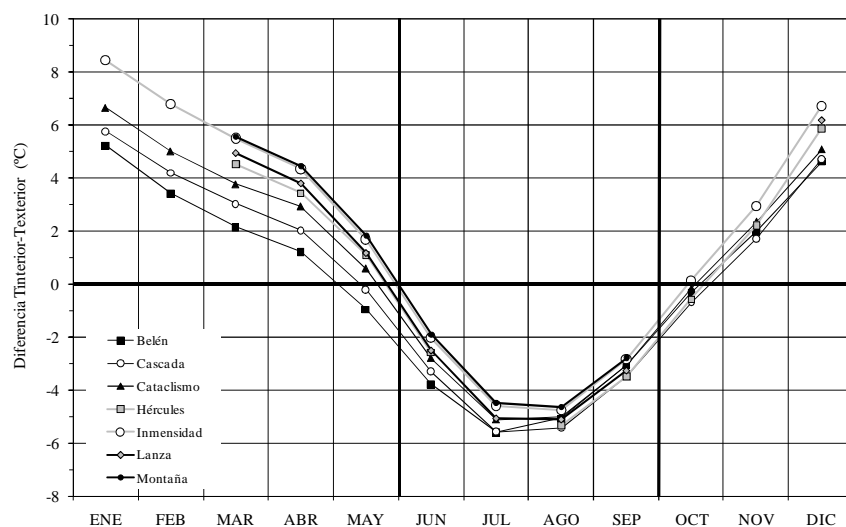


Fig. 2. Diferencias entre las temperaturas interiores y la temperatura en el exterior de la cueva. Valores medios mensuales obtenidos a partir de valores horarios.

La longitud de la serie de datos disponible en algunas de las salas investigadas (agosto 2006- junio 2008, en el mejor de los casos), junto con diversos problemas relacionados con el funcionamiento de los sensores, han limitado la disponibilidad de datos ambientales durante algunos meses del año (especialmente durante julio y agosto) a la hora de elaborar la presente publicación. Durante el período no puramente estival, la evolución temporal de la temperatura del aire en el sector no habilitado es similar a la observada en el sector turístico, salvo en la Sala de la Inmensidad, que muestra una evolución opuesta (Figs. 3 y 4). La temperatura medida en las salas de Columnas de Hércules y Lanza muestra un desfase de 1 a 2 días con respecto a la temperatura medida en el sector turístico.

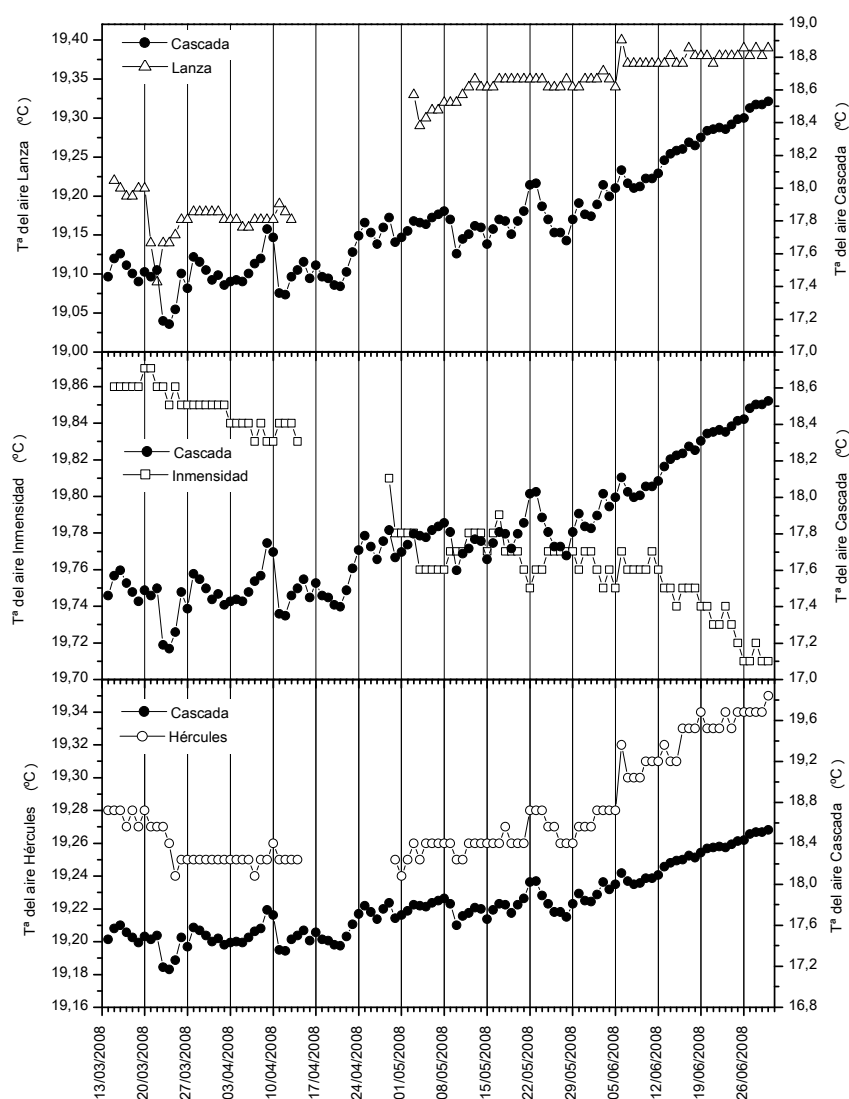


Fig. 3. Evolución temporal de la temperatura del aire en las salas de Cascada, Hércules, Inmensidad y Lanza. Datos medios diarios calculados a partir de datos horarios.

La presencia de visitantes y el empleo de iluminación artificial producen, en el sector turístico, incrementos diarios de la temperatura del aire durante el horario de apertura al público de la cavidad y disminuciones durante el período de cierre de la cueva y apagado de la iluminación (Carrasco *et al.*, 1999). En las Galerías Altas y Nuevas se observan ligeras

variaciones de la temperatura del aire a lo largo del día, pero éstas no siguen el patrón observado en el sector turístico, dado que éste es consecuencia de la entrada diaria de visitantes (Fig. 5).

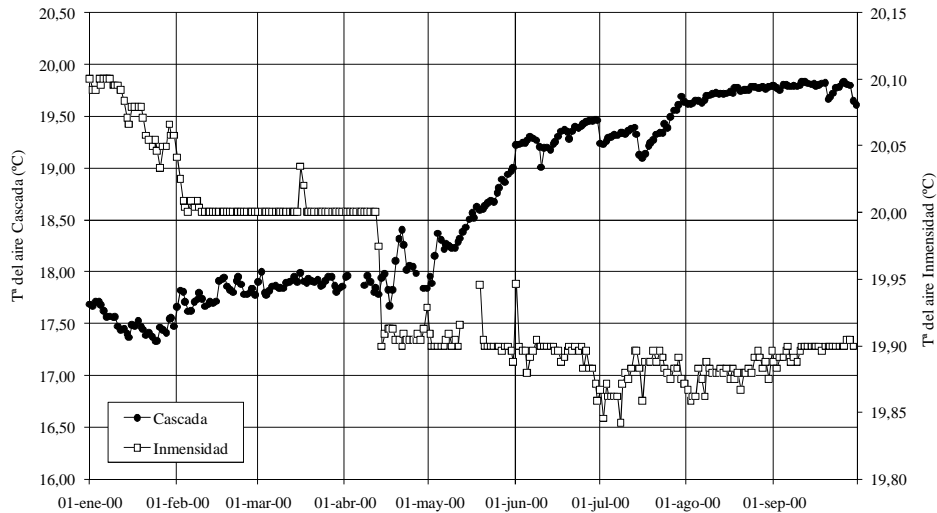


Fig. 4. Evolución temporal de la temperatura del aire de la Sala de la Inmensidad desde enero hasta septiembre de 2000 (sensor TESTO). Valores diarios calculados a partir de datos horarios.

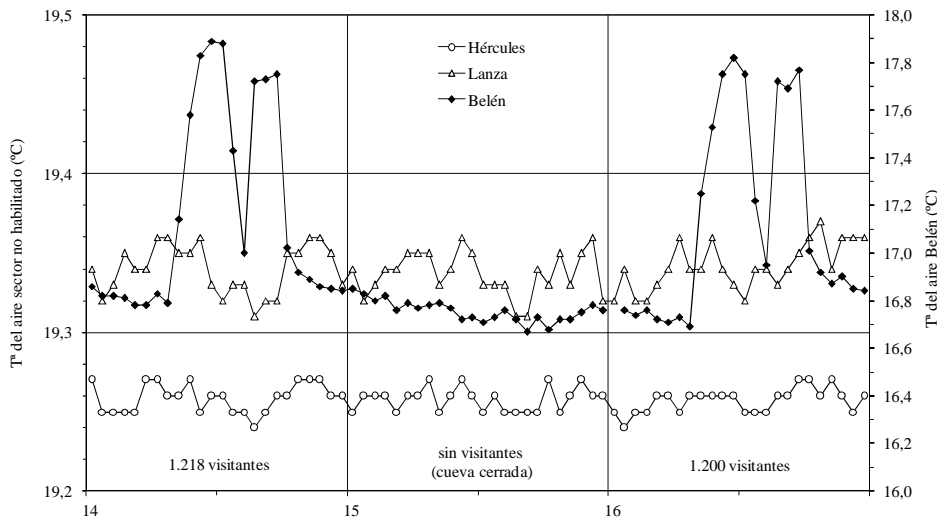


Fig. 5. Evolución horaria de la temperatura del aire de la Cueva de Nerja (salas de Belén, Columnas de Hércules y Lanza) durante los días 14 al 16 de mayo de 2008. El 15 de mayo, la cueva permaneció cerrada al público y sin iluminación.

Humedad relativa del aire

La humedad relativa del aire de la cueva aumenta con la distancia a las entradas (Fig. 1A, Tabla 1) y es, durante todo el año, mayor que la del aire exterior. En las Galerías Turísticas, este parámetro muestra valores comprendidos entre el 72 y 86 % (79 % de valor medio para todo el sector) mientras que, en el sector no habilitado, los valores de humedad relativa varían, durante el período investigado, entre el 97 y el 100 %, con un valor medio

prácticamente de saturación (Tabla 1). La Sala de las Columnas de Hércules muestra un valor medio de humedad relativa ligeramente inferior a los valores del resto de las galerías no habilitadas. Al igual que se observaba en la temperatura del aire, los coeficientes de variación de la humedad relativa del aire son especialmente bajos en el sector no habilitado (entre 0.02 y 3.70 %) (Tabla 1).

Las series de datos de humedad relativa del sector no habilitado muestran un mayor número de valores anómalos, en comparación con los restantes parámetros medidos (temperatura y CO₂ del aire) y por eso aparecen más lagunas de datos en los gráficos correspondientes. Hay que destacar que, aunque en dichas series aparecen datos de humedad relativa superiores al 100 %, estos valores no han sido eliminados de los gráficos de la presente publicación porque aportan información de interés sobre las variaciones temporales de este parámetro. Durante el período no estival (el mejor registrado), la evolución temporal de la humedad relativa del aire difiere según la sala considerada. En la Sala de las Columnas de Hércules, la humedad relativa muestra una evolución temporal similar a las de las Galerías Turísticas, con un mínimo desfase de 0-1 días (Fig. 6). En la Sala de la Inmensidad, la evolución temporal de la humedad es similar a la del sector turístico, con un desfase de 1 día, durante parte del período de registro pero, a partir de mediados de mayo, la humedad comienza a describir una evolución opuesta (Fig. 6).

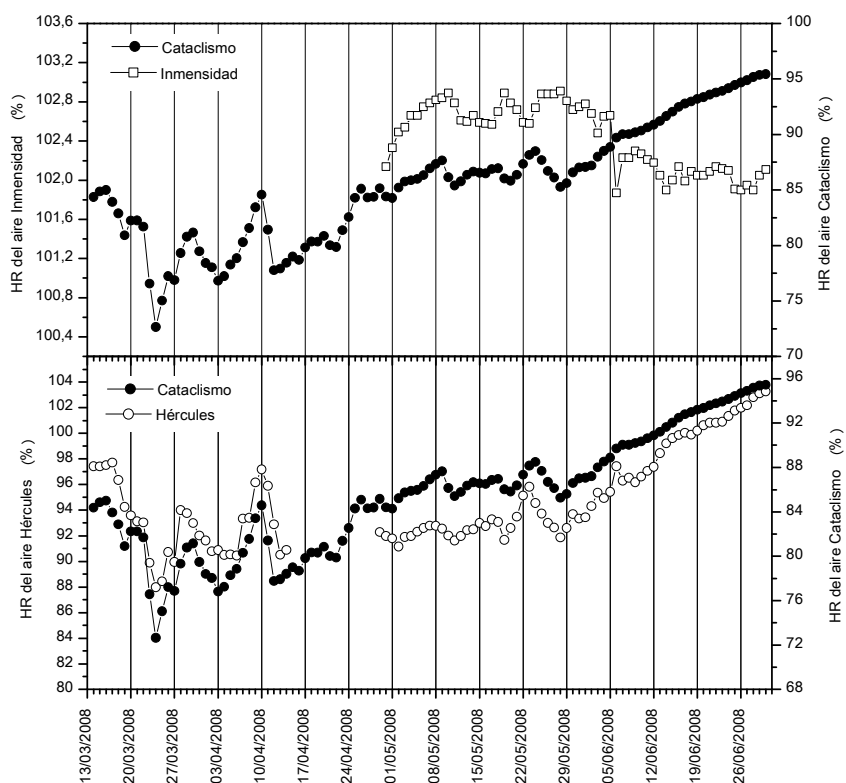


Fig. 6. Evolución temporal de la humedad relativa del aire en las salas de Cataclismo, Hércules e Inmensidad. Datos medios diarios calculados a partir de datos horarios.

En las salas controladas no se observan las variaciones diarias de humedad relativa constatadas en el sector turístico, relacionadas con la visitabilidad de la cueva (Carrasco *et al.*, 1999).

Contenido en CO₂ del aire

El contenido medio de CO₂ del aire en el sector no visitable de la cueva (Tabla 1) es de 565 ppm, inferior al medido en las Galerías Turísticas (789 ppm), si bien aparecen concentraciones puntuales de CO₂ superiores a 5000 ppm que, en principio, no se descartan como anómalas, aunque su validez deberá ser comprobada en el futuro, cuando se disponga de una serie de datos más larga. En las galerías no habilitadas, la concentración de CO₂ del aire disminuye desde la Sala de las Columnas de Hércules (711 ppm de valor medio) hacia las salas más internas, Inmensidad y Lanza, que muestran una concentración de este gas de 511 y 468 ppm, respectivamente. No se tienen datos de la sala más interna (Sala de la Montaña). Los coeficientes de variación son más elevados (del 35 al 61 %) que los del resto de parámetros medidos.

La figura 7 muestra la evolución temporal de la concentración de CO₂ del aire en varias de las salas investigadas. De nuevo se observa cómo, en líneas generales, la variación temporal del CO₂ durante el período no estival en el sector no habilitado es similar a la del sector turístico hasta, aproximadamente, el mes de junio. Los picos destacados de CO₂ que se identifican en la citada figura permiten establecer un desfase de 0 a 1 días en las salas de Columnas de Hércules e Inmensidad, con respecto a la sala del sector turístico (Cascada). Sin embargo, a partir de mediados del mes de junio, se observa como este desfase se “invierte”, de modo que uno de los picos destacados de CO₂ se detecta primero en la Sala de la Inmensidad, después en la Sala de las Columnas de Hércules y, finalmente, en la Sala de la Cascada (ver picos marcados con (1), (2) y (3) en la figura 7).

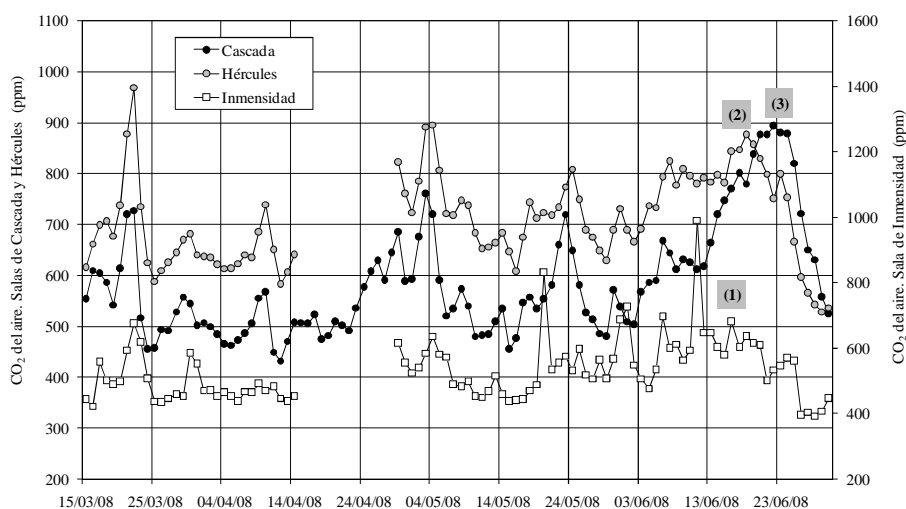


Fig. 7. Evolución temporal de la concentración de CO₂ del aire medida en las salas de la Cascada (Galerías Turísticas), Columnas de Hércules e Inmensidad (sector no habilitado). El pico (1) es de dudosa asignación, podría también corresponder al inmediatamente anterior al señalado en la figura.

A pesar de que en las Galerías Altas y Nuevas las variaciones diarias de la concentración de CO₂ no siguen el patrón observado en el sector turístico, puesto que éste es una consecuencia de la visitabilidad de la cueva, se ha constatado la influencia del CO₂ de origen antrópico en los sectores no visitables de la cavidad, incluso en los más alejados de las Galerías Turísticas, durante épocas invernales de alta visitabilidad.

La figura 8 muestra la variación horaria de la concentración de CO₂ del aire en las salas de Cascada, Columnas de Hércules, Inmensidad y Lanza, desde el día 3 al 12 de diciembre de 2007, período que comprende el puente festivo “Constitución-Inmaculada”. En relación con los días de mayor afluencia de visitantes a la zona turística de la cueva (días 6 al 9), se observan aumentos en la concentración de CO₂ del aire en el sector turístico que se detectan posteriormente en el sector no habilitado, con un desfase variable, inferior a un día en la Sala de las Columnas de Hércules, del orden de un día y medio en la Sala de la Inmensidad y de unos dos días en la Sala de la Lanza. El efecto antrópico es más notable en la Sala de las Columnas de Hércules que en el resto de salas controladas, más alejadas de las Galerías Turísticas.

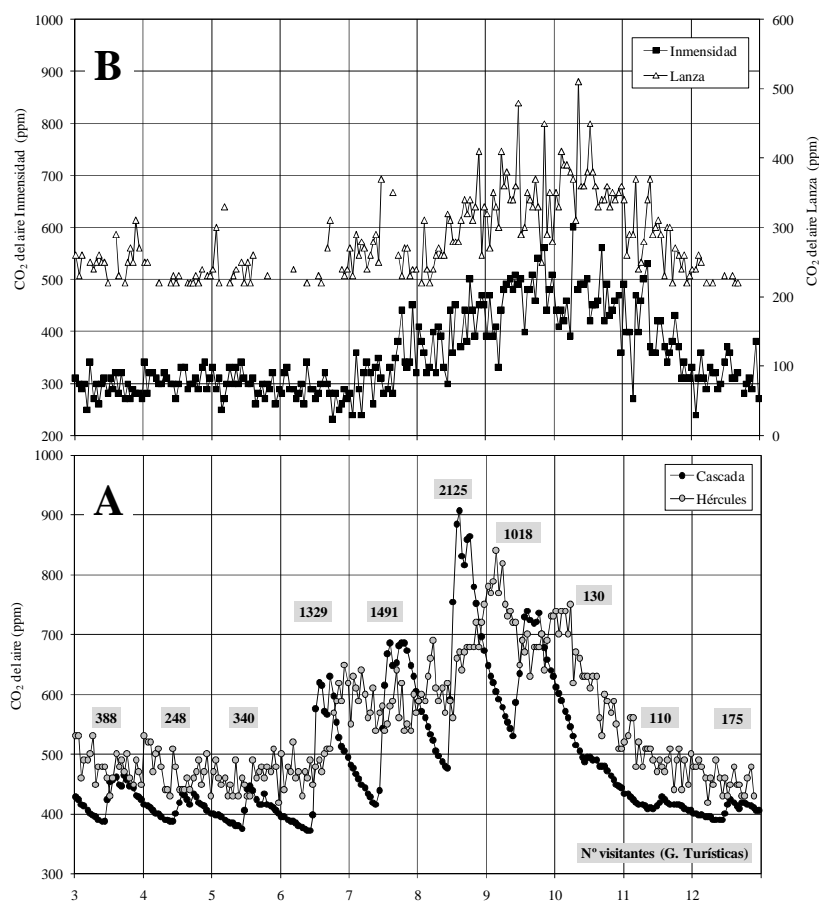


Fig. 8. Concentración de CO₂ del aire, desde el día 3 al 12 de diciembre de 2007, en las salas de (A) Cascada y Columnas de Hércules y (B) Inmensidad y Lanza.

Discusión y conclusiones

La monitorización ambiental realizada en diversas salas de la Cueva de Nerja permite determinar la existencia de un gradiente higrótérmico y de CO₂ en la cavidad, aumentando la temperatura y la humedad relativa del aire hacia las salas más internas de la misma y disminuyendo la concentración de CO₂. En el sector no habilitado, por lo tanto, el aire es más cálido, más húmedo y tiene menor concentración de CO₂ que el aire de las Galerías Turísticas, en consonancia con su ubicación, más alejada de las entradas de la cueva y más profunda con respecto a la superficie y el reducido número de visitantes que recibe.

Este gradiente higrótérmico general se distorsiona en las salas de Inmensidad y Lanza, ya que la primera, a pesar de estar más próxima a las entradas de la cueva, tiene mayor temperatura del aire que la segunda. En la Sala de la Inmensidad, aparecen evoluciones temporales de este parámetro que difieren de las observadas en el resto de salas de la cavidad. En concreto, la variación temporal de la temperatura del aire de la sala es opuesta a la de las restantes salas monitorizadas y, de este modo, la temperatura del aire de la Sala de la Inmensidad es mínima durante el período estival y más elevada el resto del año.

Estudios previos basados en la concentración de radón en el aire (Cañete, 1997) han determinado que durante los meses de otoño, invierno y primavera existe un alto grado de ventilación de la cavidad, porque el aire exterior es más frío y, por lo tanto, más denso, que el aire de la cueva y entra en ésta fácilmente, desplazando al aire interior, según un modelo de circulación convectiva. En verano, por el contrario, el grado de ventilación de la cavidad es menor porque el aire exterior es más cálido y, por tanto, menos denso que el aire interior, de modo que la entrada de aire del exterior disminuye o se limita. Esta circulación convectiva es coherente con los datos obtenidos en diversos perfiles verticales de temperatura y concentración de CO₂ del aire realizados en varios sondeos perforados en el entorno de la cavidad, en los cuales se aprecia, durante los meses de otoño-invierno, flujos ascendentes de aire cálido y con elevada concentración de CO₂ (Benavente *et al.*, 2006).

En determinados sectores de la cueva se percibe la existencia de corrientes de aire de cierta intensidad, cuyo sentido es posible determinar de modo rudimentario, espolvoreando sobre ellas material limoso. De este modo, es posible visualizar hacia dónde se dirige el flujo de aire, si hacia el interior o hacia el exterior de la cavidad. La observación directa de la dirección de estas corrientes de aire en el sector de *Luz Roja* (zona de conexión entre las Galerías Turísticas y las no visitables) a lo largo de un año y medio, ha permitido comprobar cómo, durante los meses de enero a mayo/junio y de octubre a diciembre, las corrientes de aire se dirigen desde la Sala del Cataclismo hacia el interior de la cueva. Por el contrario, en junio/julio, agosto y septiembre, las corrientes de aire se dirigen desde las Galerías Altas hacia la Sala del Cataclismo, al menos durante los períodos del día (generalmente por la mañana) en los que se han hecho las observaciones.

La llegada de CO₂ de origen antrópico procedente del sector turístico hasta el sector no habilitado, durante el período invernal (Fig. 8), confirma la importante ventilación de la cueva en esta época del año y corrobora las observaciones realizadas sobre la dirección de dicho flujo. Los datos disponibles de velocidad de viento en uno de los conductos que conectan el exterior con las Galerías Turísticas (*Conducto del Descubrimiento*) y en el conducto de *Luz Roja* (Figs. 1A y 9), indican que la velocidad es más elevada durante los meses de invierno, lo

cual también está en consonancia con una mayor ventilación de la cavidad durante este período de tiempo, por circulación convectiva.

Este modelo de circulación convectiva predominante durante el período invernal, junto con las propias características topográficas de la cavidad, podría explicar la evolución particular de la temperatura del aire de la Sala de la Inmensidad. En la zona topográficamente más baja de dicha sala existe una galería, la Galería de los Niveles, que desemboca en la Sala de la Lanza. En invierno, el aire exterior más frío y, por lo tanto, más denso, circularía predominantemente a lo largo de dicha galería o bien a través de los sectores más bajos de la sala, mientras que el aire más cálido saldría hacia el exterior por zonas próximas al techo o a través de fracturas del techo de la sala. Dado que el sensor que mide la temperatura se ubica en una zona próxima al techo, los valores de temperatura corresponden al aire más cálido que circula por la sala.

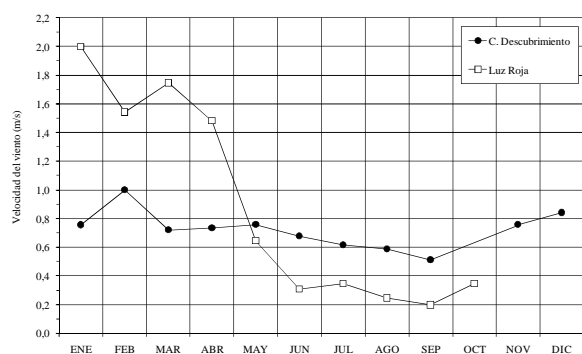


Fig. 9. Velocidad del viento medida en los conductos del a) Descubrimiento y b) Luz Roja, durante el año 2003. Valores mensuales obtenidos a partir de valores horarios.

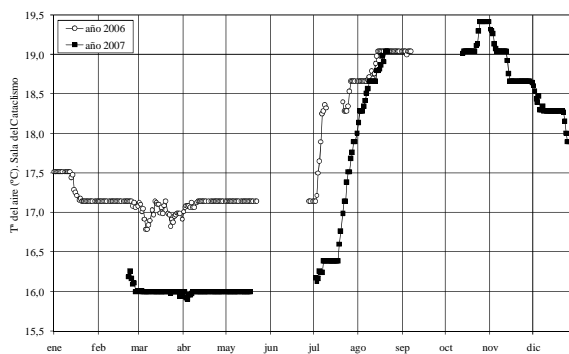


Fig. 10. Temperatura del aire medida justo a la salida de la conexión, no practicable, entre las salas de Cataclismo y Columnas de Hércules durante los años 2006 y 2007.

A partir de mayo/junio, se observan particularidades en las evoluciones temporales de las salas de Columnas de Hércules e Inmensidad. En apartados previos se ha descrito la inversión observada en el CO₂ del aire de ambas salas, con respecto a las Galerías Turísticas (Fig. 7), inversión que corrobora la llegada de aire procedente del sector no habilitado al sector turístico. Otra prueba de esta inversión en el flujo de aire, además de la observación directa en *Luz Roja*, aparece al analizar la evolución temporal de la temperatura del aire medida justo a la salida de una conexión, no practicable, entre las salas de Cataclismo y Columnas de Hércules. La particular ubicación del sensor ha permitido detectar, durante todos los años de control, bruscos incrementos de la temperatura del aire a comienzos del verano (Fig. 10), como consecuencia de la llegada, a través de este conducto, de un flujo de aire más cálido procedente del sector no habilitado.

Durante el período estival, la circulación convectiva se restringe, de modo que el aire exterior no llega a las Galerías Altas y Nuevas. Al contrario, es el aire del sector no habilitado el que llega a la zona turística. Una posible hipótesis es que, durante el período estival, se produzca una circulación barométrica del aire. En esta hipotética situación, la presión atmosférica interior sería mayor que la exterior durante el período estival, estableciéndose un flujo del aire esencialmente horizontal que se dirigiría hacia el exterior de la cueva. Massen *et al.* (1998 a y b) consideran que las diferencias de presión están correlacionadas con los

cambios de velocidad del aire en los accesos a una cavidad. Aunque no se dispone de datos fiables de presión en el interior de la cueva, las variaciones de velocidad del aire detectadas tanto en el *Conducto del Descubrimiento* como en *Luz Roja* (Fig. 9), están en consonancia con posibles cambios de presión durante los meses de verano.

En el marco de este modelo teórico de circulación barométrica estival, los valores más bajos de temperatura del aire que se registran en la Sala de la Inmensidad durante los meses de verano estarían relacionados con la llegada de aire más frío, procedente de la Sala de la Lanza.

La confirmación del modelo propuesto requiere una investigación más detallada y prolongada en el tiempo, puesto que la información relativa a los parámetros ambientales del sector no habilitado, especialmente durante los meses de verano, es limitada. La aplicación de técnicas geoestadísticas, de eficacia contrastada en otras cuevas abiertas al turismo (Fernández-Cortés *et al.*, 2006), podría aportar información de interés en la delimitación de zonas de estabilidad-inestabilidad de las diferentes variables ambientales medidas en la Cueva de Nerja y en la modelización del posible impacto antrópico.

De confirmarse las hipótesis propuestas, el modelo de circulación de aire en la Cueva de Nerja limitaría, durante la época de mayor visitabilidad, el alcance de los efectos antrópicos, ya que éstos sólo afectarían a las Galerías Turísticas y tenderían a ser eliminados hacia el exterior de la cueva.

Referencias

Andreo, B., Carrasco, F. y Sanz de Galdeano, C. 1993. Estudio geológico del entorno de la Cueva de Nerja. En: Carrasco, F. (ed.). *Geología de la Cueva de Nerja. Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, 3, 25-50. Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga.

Benavente, J., Vadillo, I., El Mabrouki, K., Carrasco, F., Molina, J.L., Liñán, C. y Simón, M. 2006. Identificación de flujos de aire con elevada concentración de CO₂ en la zona no saturada de un karst mediterráneo (entorno de la Cueva de Nerja, Málaga, España). En: Durán, J.J., Andreo, B. y Carrasco, F. (eds.), *Karst, cambio climático y aguas subterráneas.*, Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, serie Hidrogeología y aguas subterráneas nº 18, Madrid, 349-356.

Cañete, S. 1997. *Concentraciones de Radón e intercambio de aire en la Cueva de Nerja*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Málaga, 84 p.

Carrasco, F., Andreo, B., Vadillo, I., Durán, J.J. y Liñán, C. 1999. El medio ambiente subterráneo de la Cueva de Nerja (Málaga). Modificaciones antrópicas. En: Andreo, B., Carrasco, F. y Durán, J.J. (eds.). *Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico*. Nerja (Málaga), 323-334. Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga.

Fernández-Cortés, A., Calaforra, J.M., Jiménez-Espinosa, R. y Sánchez-Martos, F. 2006. Geostatistical spatiotemporal analysis of air temperature as an aid to delineating thermal

stability zones in a potential show cave: implications for environmental management. *Journal of Environmental Management*, 81, 371-383.

Grupo de Espeleología de Málaga (G.E.M.A.) 1977. Cueva de Nerja, *Jábega*, 17, 48-58.

Hoyos, M. 1989. *Informe previo sobre los trabajos de geología realizados en la Cueva de Nerja durante 1989*. Inédito. Archivo de la Fundación Cueva de Nerja.

I.G.M.E. 1983. *Informe nº 10 sobre el Sistema Acuífero nº 41: calizas y dolomías triásicas de la Sierra Almajara-Sierra de Lújar*. Memoria y anejos. Edición interna, Madrid.

Liñán, C., Calaforra, J.M., Cañaveras, J.C., Carrasco, F., Fernández Cortés, A., Jiménez Sánchez, M., Martín Rosales, W., Sánchez Martos, F., Soler, V. y Vadillo, I. 2004. Experiencias de monitorización medioambiental en cavidades turísticas. En: Andreo, B. y Durán, J.J. (eds.). *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, serie Hidrogeología y aguas subterráneas nº 12, Madrid, 385-429.

Massen, F., Duser, M., Loy, W. y Vandenberghe, N. 1998a. Cave volumen compute don the behaviour of a blowing well (Tournasi basin, W. Belgium). *Terra Nova*, 10 (3), 131-135.

Massen, F., Duser, M., Loy, W. y Vandenberghe, N. 1998b. Blowing wells and cavity volumes in concealed karst: application to the Ramegnies- Chin well in the Tournai hydrogeological basin, W. Belgium. *Aardkundige Mededelingen*, 9, 111-120.

Pérez, I. y Andreo, B. 2007. Sierra Almajara y Alberquillas. En: Durán, J.J. (ed.) *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga*, Instituto Geológico y Minero de España-Diputación de Málaga, Madrid, 2, 144-148.

S.E.M. 1985. *La Cueva de Nerja*. Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga, Málaga, 87 p.