

CARACTERIZACION MICROAMBIENTAL DE LA CUEVA DE POZALAGUA (VIZCAYA): APLICACION A LA GESTION Y PROTECCION DE CAVIDADES TURISTICAS

J. Lario*, S. Sánchez-Moral**, V. Soler***, J. C. Cañaveras****, S. Cuezva**

RESUMEN

Se presentan los datos obtenidos tras el registro en continuo de diversos parámetros microambientales en la Cueva de Pozalagua (Vizcaya) durante el período del 1 de abril de 2001 al 1 de julio de 2002. La singularidad de esta cueva turística se debe a la alta presencia de espeleotemas tipo excéntricas o helictitas. Tras la caracterización de la roca encajante y diversos espeleotemas, así como de la hidroquímica de las aguas de infiltración que circulan por la misma, se ha evaluado el efecto que tienen las visitas turísticas en esta cavidad. Se constata que las visitas influyen claramente en la temperatura de la cavidad y en los niveles de CO₂ de la misma, de lo que el sistema natural tarda tiempo en recuperarse. En períodos de visitas masivas se ha comprobado que el incremento de temperatura que se produce en la cavidad es superior a la oscilación térmica natural de la misma durante un ciclo anual. Se proponen medidas de gestión de la cavidad, principalmente enfocadas a optimizar el régimen de visitas, que minimicen el impacto de las mismas y que permitan mantener las condiciones microambientales de la cavidad cercanas a las condiciones originales naturales.

Palabras clave: karst, cueva turística, monitorización, microambiente, helictitas.

ABSTRACT

There are summarized the data obtained after monitoring some microenvironmental parameters in the Pozalagua cave from 1st April 2001 to 1st July 2002. The singularity of this show cave is because the high amount of helictites type speleothems. Host rock, speleothems and infiltration waters have been analysed as well as the effect of the visits into the cave have been evaluated. It is stated that visits influence the temperature and CO₂ levels inside the cave and the natural system need some time in recover from this changes. During massive visits increase in cave temperature is over the natural annual thermal oscillation. Management guidelines focused in visits schedule have been proposed in order to minimize the effects of the visits and to keep the cave microenvironment near the natural conditions.

Key words: karst, show cave, monitoring, microenvironment, helictites.

Introducción

Las cavidades kársticas constituyen sistemas naturales bajo condiciones más o menos estables en los que cualquier perturbación de sus parámetros puede modificar el equilibrio energético del sistema. En el caso de las afecciones que los visitantes provocan al microambiente de cavidades kársticas, existen numerosos trabajos previos.

Estos trabajos están enfocados tanto a la protección de cavidades con patrimonio cultural, generalmente grabados y pinturas prehistóricas, como a conocer su influencia en cavidades naturales con uso turístico. En la segunda mitad de la década de los cincuenta se inician de forma sistemática los trabajos sobre el conocimiento y distribución de los parámetros microambientales en cavidades kársticas. Sin embargo, es en la década de los

* Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Senda del Rey, 9, 28040 Madrid.

** Dep. Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. José Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid.

*** Instituto de Productos Naturales y Agrobiología, CSIC. Avda. Astrofísico Fco. Sánchez, La Laguna, Tenerife.

**** Dpto. CC. de la Tierra y del Medio Ambiente. Universidad de Alicante, 03080 Alicante.

setenta cuando los conocimientos adquiridos hasta entonces se empezaron a aplicar a cuevas frecuentemente visitadas (Andrieux, 1974; Wilkening and Watkins, 1976). Posteriormente, en los ochenta y noventa, son ya más numerosos los trabajos que se han ocupado de una forma u otra de la influencia de las transformaciones antrópicas en el medio kárstico y de los visitantes en las condiciones microambientales de las cavidades kársticas (Villar *et al.*, 1984; Ek and Gewalt, 1985; Fernández *et al.*, 1986; Andrieux, 1988; Cigna, 1993; Pulido-Bosch *et al.*, 1997; Hoyos *et al.*, 1998; Cañaveras *et al.*, 1999; Sánchez-Moral *et al.*, 1999). En el caso de España, es en la actual década cuando, asociado al incremento de visitantes en cavidades turísticas, empiezan a ver la luz diversos trabajos enfocados a caracterizar el microambiente de las cavidades y a aplicar dichos estudios a la optimización del régimen de visitantes, estando la mayoría de estos trabajos sintetizados en Liñan *et al.* (2004). La principal conclusión que se obtiene de este grupo de estudios y de los anteriores, es que la resolución de problemas de conservación en cuevas está directamente relacionada con un completo conocimiento del equilibrio físico-químico del sistema kárstico. Este equilibrio depende de los intercambios naturales de energía entre la atmósfera de la cueva, la superficie de la roca, el agua kárstica y la atmósfera exterior.

El presente trabajo es el resultado de las observaciones y trabajos llevados a cabo en la Cueva de Pozalagua durante el período abril 2001-julio 2002, con la finalidad de conocer el período de variación anual de los parámetros microambientales en el interior de dicha cavidad. De esta forma se puede evaluar el régimen de visitas óptimo (distribución y número de visitantes por día) con el objetivo de minimizar los procesos de alteración y deterioro irreversibles, como los que tienen lugar en otras cavidades turísticas. Para ello se instaló un equipo de registro continuo de los parámetros ambientales más relevantes. Las condiciones ideales para este tipo de estudios deben incluir el registro y análisis de un ciclo anual previo al desarrollo de cualquier actividad antrópica en la cavidad. En este caso el registro de datos se ha desarrollado después de que la cueva esté abierta al turismo durante varios años y de que se hayan producido algunas actuaciones humanas importantes, como la apertura con explosivos de la actual entrada a la cavidad debido a la actividad extractiva de una cantera situada en el entorno cercano, así como el cierre de entradas naturales con el fin de controlar el acceso a la cueva. En estas condiciones es difícil determinar los estados microambientales de la cavidad previas al uso turístico de la misma.

Características geológico-kársticas

La Cueva de Pozalagua está localizada en el oeste de la provincia de Vizcaya y se sitúa a 500 msnm, en el flanco sur del anticlinal de Carranza (Vizcaya) constituido por calizas urgonianas (IGME, 1978), limitadas por la falla de Ruahermosa al Noreste, la franja de cabalgamiento de Ramales al Este, y el extremo oriental de la falla de Ramales al Sur. Forma parte de un importante sistema kárstico de 15 km² (Ugarte, 1989), cuyo desarrollo ha estado condicionado por la estructura y composición litológica de la formación calcárea y la fracturación alpina.

Las calizas que componen el macizo kárstico de Carranza son variadas en composición y textura, correspondiendo, en su mayor parte, a calizas recifales y pararrecifales de las facies urgonianas. Se presentan en grandes bancos de estratificación masiva o difusa, con intercalaciones locales de calizas blancas y negras con estratificación paralela en niveles de orden métrico, acompañadas de brechas intraformacionales. En las zonas de fracturas se encuentran, a favor de dichas fracturas, franjas irregulares de calcitización y dolomitización generadas a partir de circulación de fluidos hidrotermales. Estas calizas presentan buzamientos suaves de 15° a 20° hacia el SE, localmente superiores a 30° en las zonas de falla. La Cueva de Pozalagua se ha desarrollado a favor del contacto entre la caliza y la brecha dolomítica, generada a favor una falla N145°E por donde han circulado fluidos hidrotermales que han favorecido la dolomitización de las calizas. Las familias de fracturas que afectan al macizo calcáreo se corresponden con las direcciones principales de fallas (N-S, NO-SE, NE-SO y E-0) y condicionan las directrices de los conductos kársticos, de mayor y menor desarrollo, y vías principales para las aguas de infiltración.

En la zona que nos ocupa y de forma resumida, entre los rasgos fundamentales del sistema kárstico de Carranza (Monte Ranero-Peña del Carlista) destacan: en la zona superior, el predominio de un fuerte lapiaz poligénico y el desarrollo de pequeñas y medianas dolinas en embudo con abundantes torcas o simas, de conductos verticales o de fuerte inclinación, generadas a favor de la conjunción de fracturas, con muy diferente desarrollo en profundidad. En la zona intermedia e inferior del karst estos conductos verticales comunican con galerías y salas de desarrollo horizontal o mixto con fuertes descensos, que fueron generadas también a favor de fracturas, pero en las que las diferencias composicionales de la roca han jugado también un papel importante. Es de destacar, entre todas ellas, la Torca del Carlista (Álvarez Ortega, 1999), próxima a la Cueva de

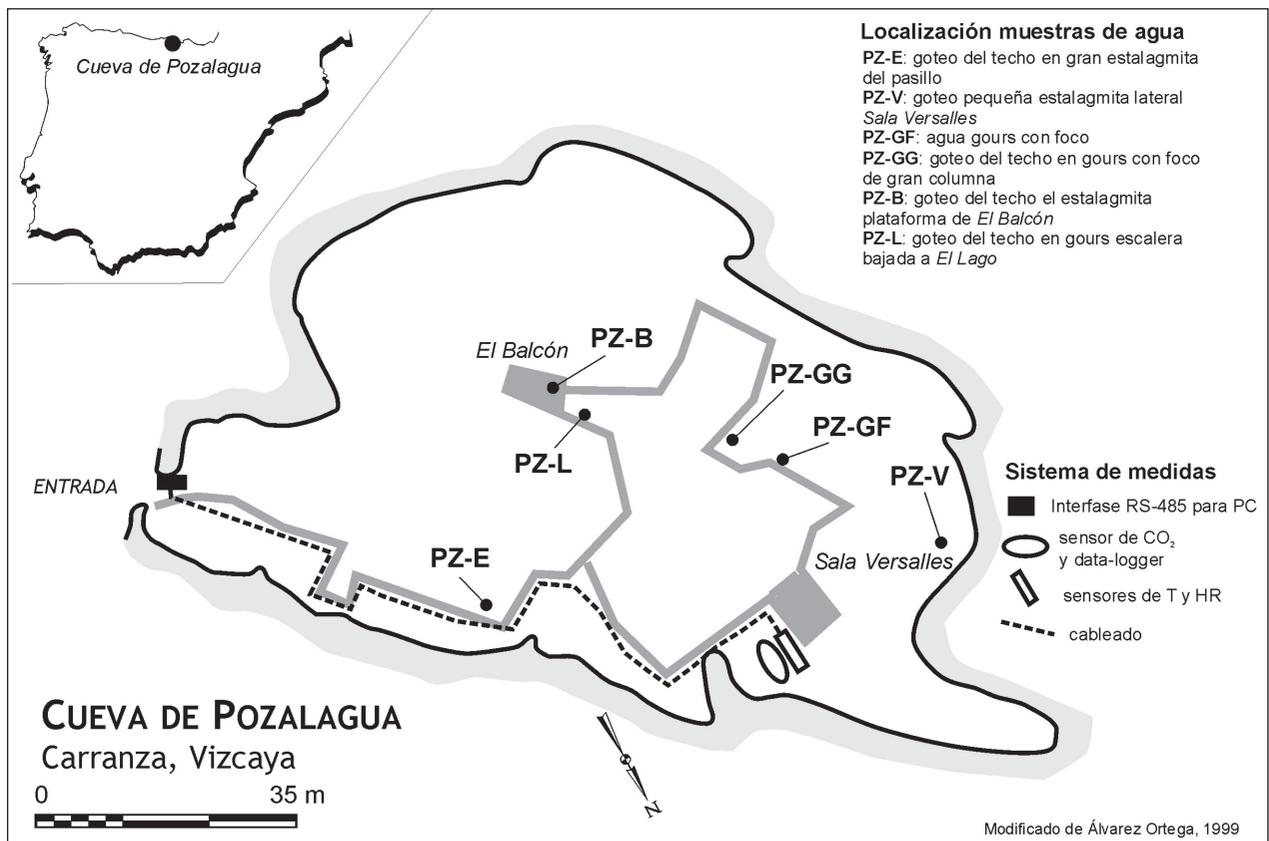


Fig. 1.—Esquema de la cavidad y localización del sistema de medidas y de los puntos de muestreo de aguas.

Pozalagua, con una sala de grandes dimensiones (500 x 230 x 125 m), que la sitúa entre las mayores de Europa. En la zona inferior, próxima al freático, se conservan mejor, por ser más recientes y menos evolucionadas, las formas de conductos freáticos y vadosos de circulación libre, que funcionaron tanto en forma de surgencias como de sumideros relacionados con el río Carranza, correspondiendo a estos tipos el conjunto de cuevas de Venta Laperra.

La Cueva de Pozalagua (figura 1) está formada por una única sala de unas dimensiones máximas de 125 m de largo, 70 m de anchura y 12 m de altura. La cavidad, debido a la profusión de varias fases de espeleotemas y colapso de bloques, presenta dos niveles con un desnivel entre ellos de 4-5 m. En la actualidad existe una puerta metálica en su entrada, salvándose un desnivel de 3 m mediante escalera metálica. El recorrido por la cueva se realiza andando sobre una rejilla metálica con pasarela a los lados. La iluminación es mixta, con sistema de luces frías y focos de luz cálida.

El mayor atractivo de la cavidad es el alto grado de desarrollo de estalactitas excéntricas (también

llamadas helictitas). El origen de este tipo de espeleotemas excéntricos o erráticos es aún controvertido, existiendo diversas teorías al respecto (Hill y Forti, 1997). Dichas teorías incluyen, como factores responsables de su crecimiento anómalo, desde procesos controlados por aerosoles hasta impurezas en el crecimiento cristalino, desviaciones por corrientes de aire, condiciones hidroquímicas especiales pero no definidas, etc.

Respecto al régimen de visitas de la cavidad, durante el período de registro no ha existido ninguna limitación al número diario de visitantes que pueden ingresar en la cueva. En la medida de lo posible, cada grupo no excedía de 30 personas; si bien, este número se ha visto ampliamente rebasado en períodos festivos y vacacionales. El horario de visita en invierno es de 11 a 17 horas, y en verano de 10 a 19 horas. El lunes es día de descanso y no se abre la cavidad, a excepción de períodos vacacionales, puentes y festivos. El tiempo de estancia de cada grupo en el interior ha oscilado entre 40 y 50 minutos, existiendo un descanso mínimo de unos 10 minutos entre grupos. La puerta de acceso se abría

para la entrada y salida de los visitantes y permanecía cerrada mientras se realizaba la visita. Durante todo el período diario de apertura de la cueva a las visitas la iluminación ha permanecido encendida.

El número de visitantes a lo largo del período de medidas ha sido registrado por los guardas de la cueva. Durante el período de estudio se tiene constancia de la entrada a la cavidad de un total de 61.423 visitantes, con un máximo de 1.100 visitantes el 29 de marzo de 2002 (Semana Santa).

Metodología

Mineralogía, petrología y geoquímica

Con el fin de caracterizar el estado general de la roca, porosidad y cementación, se tomaron una serie de muestras de roca encajante de la cavidad y de las cortezas espeleotémicas parietales y cenitales para su estudio mineralógico, petrográfico y geoquímico. Se estudiaron un total de 6 láminas delgadas mediante microscopio petrográfico (luz polarizada), así como se analizó la mineralogía de cinco muestras mediante difracción de rayos-X (DRX) y se realizaron cuatro análisis químicos por fluorescencia de rayos-X (FRX).

Diseño del sistema de medidas de parámetros microambientales

Está basado en un sistema de adquisición de datos (SAD) de ocho canales de 16 bits de resolución, con capacidad para almacenar 32.000 medidas. Con el fin de garantizar el funcionamiento del sistema durante los períodos en los que se produzcan fallos en la red de suministro eléctrico, el sistema está provisto de una batería que permite su funcionamiento y registro inatendido durante cortos períodos de tiempo (6-7 días), en los que podría subsanarse la falta de alimentación. Además se instaló un sistema de alarmas luminosas que facilitara a los responsables de la cueva la detección de un posible fallo de alimentación. A pesar de ello, el sistema quedó desconectado provocando la falta de registro durante más de 60 días.

Para adaptarnos a las pequeñas variaciones naturales de la cueva y sacar el máximo rendimiento del sistema, utilizamos el siguiente conjunto de sensores y acondicionadores de señal:

— Sensor de temperatura (T) de aire que utiliza un elemento Pt100 con rango de medida restringido a 0-50 °C y resolución de 0,01 °C. Transmisión en tensión.

— Sensor de CO₂ basado en espectrometría no dispersiva de radiación infrarroja, de doble haz, resolución de 1 ppm y rango de 0-7.000 ppm. Salida en corriente de 4-20 mA y posterior transformación a tensión.

— Sensor de humedad relativa de tipo capacitivo con rango de 0-100% y resolución de 0,1%. Salida en tensión.

— Sensor de presión atmosférica que utiliza un elemento detector de diafragma de silicio compensado en temperatura, con rango barométrico y resolución de 0,1 Hpa. Salida en tensión.

El sistema se completa con una fuente de alimentación estabilizada, situada a la entrada de la cavidad, con salidas reguladas de +24 V, +12 V, -12 V y tensión de carga de la batería de *back-up*. Esta fuente incluye disyuntores para protección contra las inducciones producidas en la línea de alimentación por las descargas atmosféricas.

El equipo de sensores y el SAD están situados dentro de la cavidad, en la Sala Versailles, donde se encuentra la mayor concentración de helicitas y otros espeleotemas, y donde las visitas están paradas más tiempo (de 10 a 15 minutos).

Mediante un cable de alimentación de baja tensión y una interface RS485 se realiza la transmisión hasta la entrada de la cueva, en donde con un convertidor RS485/RS232 nos comunicamos, vía PC, con el SAD. De esta forma todas las operaciones rutinarias de descarga de datos, verificación de los sensores y puesta en marcha del equipo se realizan desde el exterior de la cueva. En la figura 1 se detalla la localización de los diferentes elementos del sistema de medidas.

Se ha contado además con los datos meteorológicos suministrados por el Servicio Vasco de Meteorología de la estación G065 de Cerroja-Carranza (Vizcaya) con coordenadas UTM longitud 467000 y latitud 4784172 y situada a una altitud de 677 m sobre el nivel del mar.

Hidroquímica de las aguas kársticas

La caracterización hidroquímica de las aguas kársticas se ha basado en la realización de cuatro campañas de muestreo de aguas (29 de marzo de 2001, 7 de julio de 2001, 23 de febrero de 2002, 22 de marzo de 2002) con toma de muestras en el interior de la cavidad. Todas las muestras fueron recogidas en frascos de 200 ml previamente lavados con agua bidestilada. Los parámetros físico-químicos susceptibles de sufrir modificaciones por almacenamiento y transporte de las muestras (ej.: temperatura, pH, CO₂, y conductividad) se determinaron *in*

situ con equipos portátiles y mediante métodos de titración estándar.

Las muestras fueron transportadas en contenedores isoterms (12-13 °C) hasta el laboratorio donde se realizaron los análisis químicos completos, mediante espectrometría de absorción atómica y electroforesis capilar iónica. A partir de los datos así obtenidos, se pueden realizar los cálculos geoquímicos necesarios para conocer el estado de saturación de las aguas kársticas. Para ello se ha utilizado el programa PHRQPITZ (Plummer *et al.*, 1988) con su base de datos termodinámicos revisada y actualizada.

Resultados

Caracterización mineralógica, petrológica y geoquímica de roca y espeleotemas

Se han reconocido varios tipos petrográficos de roca encajante (figura 2):

Doloesparitas claras. Formadas por mosaicos macrocristalinos xenotópicos (dolomita tipo «saddle» o «baroque»), que constituyen los encajantes (bandas) de tonalidad clara (blanca a amarillenta). Estos mosaicos están constituidos por grandes cristales de caras curvas y extinción ondulante, que presentan un alto contenido en impurezas (óxidos-hidróxidos de Fe, inclusiones fluidas, anhidrita y relictos de calcita) cuando son fases reemplazantes; siendo mucho más limpios y claros cuando se trata de fases cementantes. La formación de este tipo de fábrica es indicativa de grandes profundidades de enterramiento y altas temperaturas (60-150 °C). Su génesis es generalmente resultado de procesos de sulfato-reducción termoquímica en presencia de materia orgánica y se asocian a mineralizaciones de sulfuros y/o actividad hidrotermal.

Doloesparitas oscuras. Constituidas por mosaicos mesocristalinos hipidiotópicos dolomíticos, ricos en impurezas que constituyen encajantes (bandas) de tonalidad oscura (marrón, ocre). Intimamente asociados al tipo petrográfico anterior formando encajantes de aspecto cebrado. Son relativamente abundantes en este tipo petrográfico las evidencias de dedolomitización (calcitización) a

Tabla 1.—Composición mineralógica de las muestras de roca analizadas por DRX

Muestra	Calcita (%)	Dolomita (%)
PZ00-R1	95-100	< 5
PZ00-R2b	100	—
PZ00-R3b	2	98
PZ00-R4	100	—
PZ00-R5	100	—

favor de grietas, planos de exfoliación y contactos intercristalinos.

Pseudoesparitas. Formadas por mosaicos calcíticos microcristalinos porfirotópicos y meso-macrocristalinos xenotópicos que también constituyen encajantes (bandas) de tonalidad oscura (marrón, ocre).

Todos los tipos petrográficos reconocidos presentan una porosidad escasa (< 2%, fundamentalmente mesoporos), que se encuentra básicamente restringida a posiciones intracristalinas y vénulas de calcita.

Las cortezas espeleotémicas analizadas consisten en una alternancia milimétrica de bandas micríticas globulíticas y empalizadas esparíticas bandeadas. Las formaciones excéntricas cenitales (helictitas) están formadas por bandas de empalizadas de cristales calcíticos (generalmente de caras curvas) con diferente cantidad de impurezas o inclusiones. Todos estos espeleotemas se apoyan coherentemente sobre el soporte dolomítico y/o calcítico sin evidenciar niveles susceptibles de sufrir descamaciones por vibraciones naturales del terreno, salvo en zonas concretas afectadas previamente por la acción de las voladuras de la cantera.

Los resultados obtenidos del análisis mineralógico de las muestras mediante difracción de rayos X y del análisis químico mediante fluorescencia de rayos X, quedan reflejados en las tablas 1 y 2.

De estos estudios se desprende que la dolomitización podría deberse a un proceso de hidrotermalismo (citados en esta zona y otras cercanas, Agirrezabala y García-Mondéjar, 2001; Aramburu *et al.*, 2002; Fernández Mendiola y Gracia-Mondéjar, 2003) y que el contacto entre la brecha dolomítica y la caliza puede ser el condicionante de la espeleogénesis (formación de cavidades). El estudio de las formaciones espeleotémicas (helictitas, coladas,

Tabla 2.—Resultados de los análisis químicos (FRX) de roca de las muestras de roca y espeleotemas

Muestra	% SiO ₂	% TiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% MgO	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O	P. Cal
PZ00-R1	0,01	0,01	—	0,02	—	7,43	49,63	1,74	0,04	41,01
PZ00-R2b	1,63	0,01	—	0,14	0,01	7,21	46,76	1,12	0,11	42,98
PZ00-R3b	0,14	—	—	0,14	0,03	20,01	35,99	0,40	0,02	43,26
PZ00-R5	0,19	—	—	0,08	—	5,59	51,49	1,54	0,08	41,01

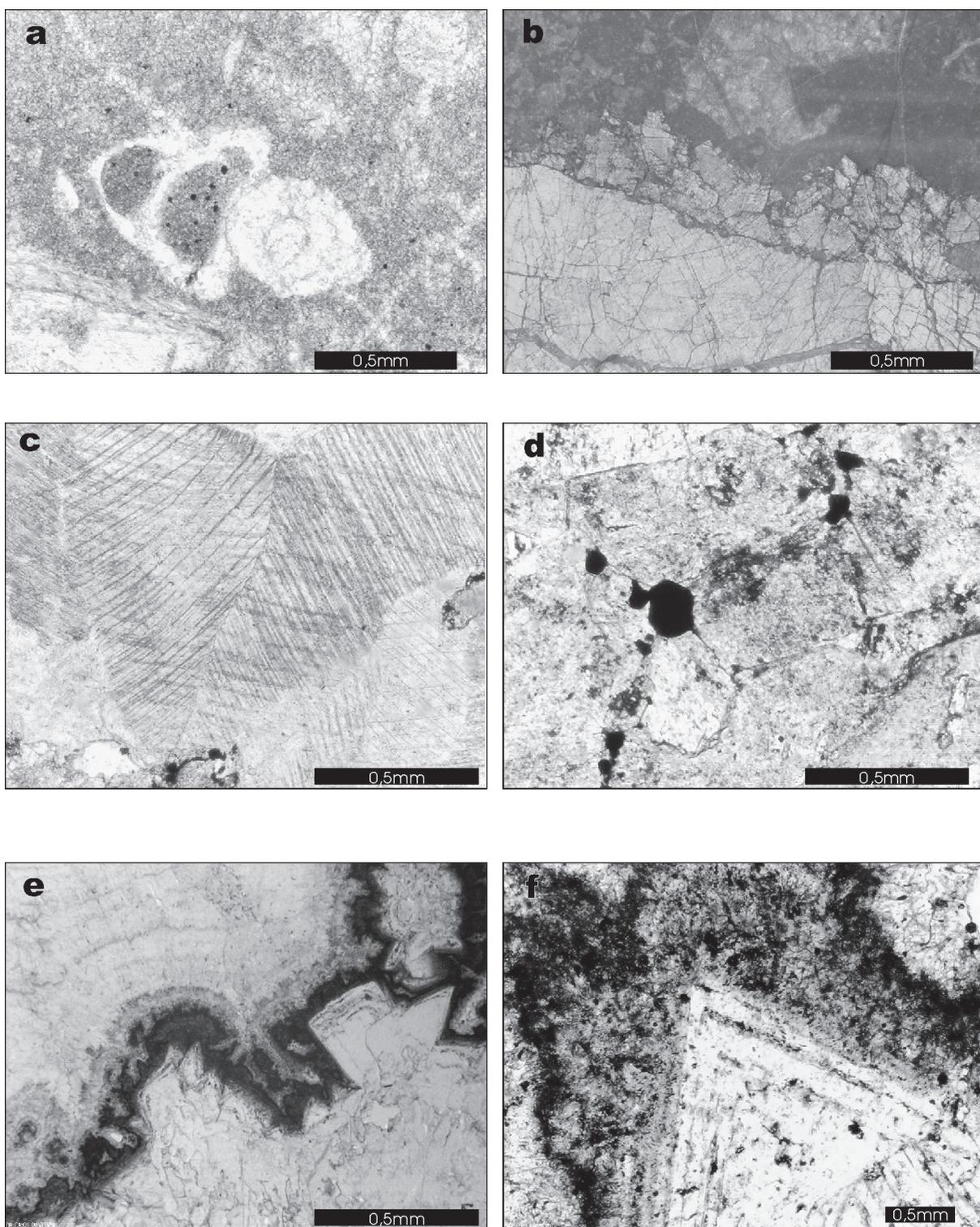


Fig. 2.—Láminas delgadas de diferentes muestras tomadas en la cavidad: *a)* Muestra PZ-00-R2A. Microesparita con restos fósiles; *b)* Muestra PZ-00-R2A. Contacto entre doloesparita brechificada y micropseudoesparita (calcita); *c)* Muestra PZ-00-R2A. Doloesparita. Detalle de cristales tipo «saddle» o «baroque» con líneas de exfoliación curvadas; *d)* Muestra PZ-00-R3A. Doloesparita. Mosaico xenotópico de cristales ricos en impurezas y evidencias de dedolomitización. Vénula de calcita en borde inferior derecho; *e)* Muestra PZ-00-R4. Espelotema (*flowstone* o colada). Alternancia de bandas micríticas globulíticas y empalizadas esparíticas zonadas; *f)* Muestra PZ-00-R4. Espelotema. Detalle de capa globulítica sobre cristal romboédrico zonado.

Tabla 3.—Valores mensuales medios, mínimos, máximos durante el período de registro microclimático

	T La Cerroja (°C)				T _{int} Pozalagua (°C)				Presión atm. (Hp)				CO ₂ (ppm)			
	Media	Mín.	Máx.	Var.	Media	Mín.	Máx.	Var.	Media	Mín.	Máx.	Var.	Media	Mín.	Máx.	Var.
May.	12,36	1,50	31,40	29,90	12,86	12,79	13,11	0,32	980	968	987	19	484	354	634	280
Jun.	15,59	7,60	30,30	22,70	12,89	12,84	13,07	0,23	982	973	990	17	626	531	744	213
Jul.	15,95	7,50	29,60	22,10	12,92	12,86	13,15	0,29	980	971	990	19	533	371	668	297
Ago.	18,26	11,20	34,10	22,90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sep.	14,09	7,80	24,70	16,90	12,99	12,94	13,20	0,27	976	965	985	20	376	302	495	193
Oct.	15,76	7,50	28,90	21,40	13,02	12,96	13,31	0,35	980	963	996	33	409	302	650	348
Nov.	7,37	1,10	18,30	17,20	13,05	13,00	13,30	0,30	986	976	996	20	482	303	836	533
Dic.	3,33	-6,30	15,40	21,70	13,00	12,96	13,19	0,24	983	973	990	17	429	370	674	304
Ene.	7,96	0,70	19,00	18,30	12,95	12,90	13,07	0,17	986	965	994	29	391	303	457	154
Feb.	7,20	1,50	16,90	15,40	12,91	12,85	13,03	0,17	984	969	997	28	430	354	499	145
Mar.	8,90	0,80	20,10	19,30	12,89	12,83	13,09	0,26	979	962	992	30	463	328	946	618
Abr.	7,59	0,50	18,90	18,40	12,88	12,81	13,00	0,19	977	958	994	36	460	388	878	490
May.	10,73	2,20	26,20	24,00	12,87	12,81	12,98	0,17	978	962	987	25	425	354	567	213
Jun.	14,15	4,50	31,60	27,10	12,91	12,84	13,09	0,25	981	966	990	24	563	448	685	237
Media	11,51	-6,30	34,10	40,40	12,92	12,79	13,31	0,53	981	958	997	39	480	302	1.097	795

cortezas), predominantemente calcíticas, denota una primera fase de crecimiento de mineralogía cálcico-magnésica (calcita y dolomita) y/o un recrecimiento y calcitización de fases cementantes secundarias dolomíticas hidrotermales.

Caracterización microambiental de la cavidad

En este apartado se presentan los resultados de las medidas realizadas y registradas entre el 12 de abril de 2001 y el 1 de julio de 2002, que nos han permitido el estudio de un ciclo microambiental anual completo. El registro se prolongó unos meses para completar la falta de datos en agosto y parte de julio y septiembre debido a problemas en el suministro eléctrico. Las informaciones sobre los parámetros atmosféricos externos proceden de la estación meteorológica de La Cerroja, en los que están registrados cada 10 minutos datos de humedad relativa, temperatura del aire y precipitaciones.

En la figura 3 queda representado el registro completo de las cifras obtenidos durante el período de estudio (T_{ext} en la estación de La Cerroja, T_{int} del aire de la cavidad, concentración de CO₂ en el aire de la cavidad, presión atmosférica en la cavidad y número de visitantes diarios). En la tabla 3 se presentan los valores mensuales medios, mínimos, máximos y rango de variación de estos parámetros, así como los valores medios para el período de registro. No se ha incluido el registro de humedad relativa del aire por su constante estado próximo a la saturación.

La ausencia de datos microclimáticos de la cueva sin las perturbaciones provocadas por la entrada de

visitantes, incluidos los efectos de la iluminación, implica una dificultad para la apreciación y distinción precisa del efecto provocado por dicha entrada en la evolución natural de las condiciones microambientales. Asimismo, la falta de datos sobre la concentración de Radón en aire (²²²Rn) impide realizar cálculos precisos sobre la tasa de intercambio de aire entre el exterior y el interior. No obstante, los datos obtenidos, una vez procesados, permiten llevar a cabo una buena aproximación a los cálculos necesarios para la posterior evaluación y propuesta de un régimen de visitas que evite un deterioro irreversible de las condiciones microambientales de la cueva desde un punto de vista inorgánico.

Exterior de la cavidad

Los datos del exterior de la cavidad, correspondientes a la estación de La Cerroja, muestran para el período de estudio una temperatura media de 11,51 °C, con un mínimo en diciembre de -6,3 °C y un máximo en agosto de 34,1 °C. La oscilación térmica anual es de 40,4 °C.

Humedad relativa del aire interior

El grado de humedad relativa del aire durante el período de registro se mantuvo siempre por encima del 97%, prácticamente siempre en saturación (100%). Esta es una característica de los ambientes subterráneos y en especial de la mayor parte de las cavidades kársticas de cierta magnitud. En este caso, el mantenimiento en saturación se ve favore-

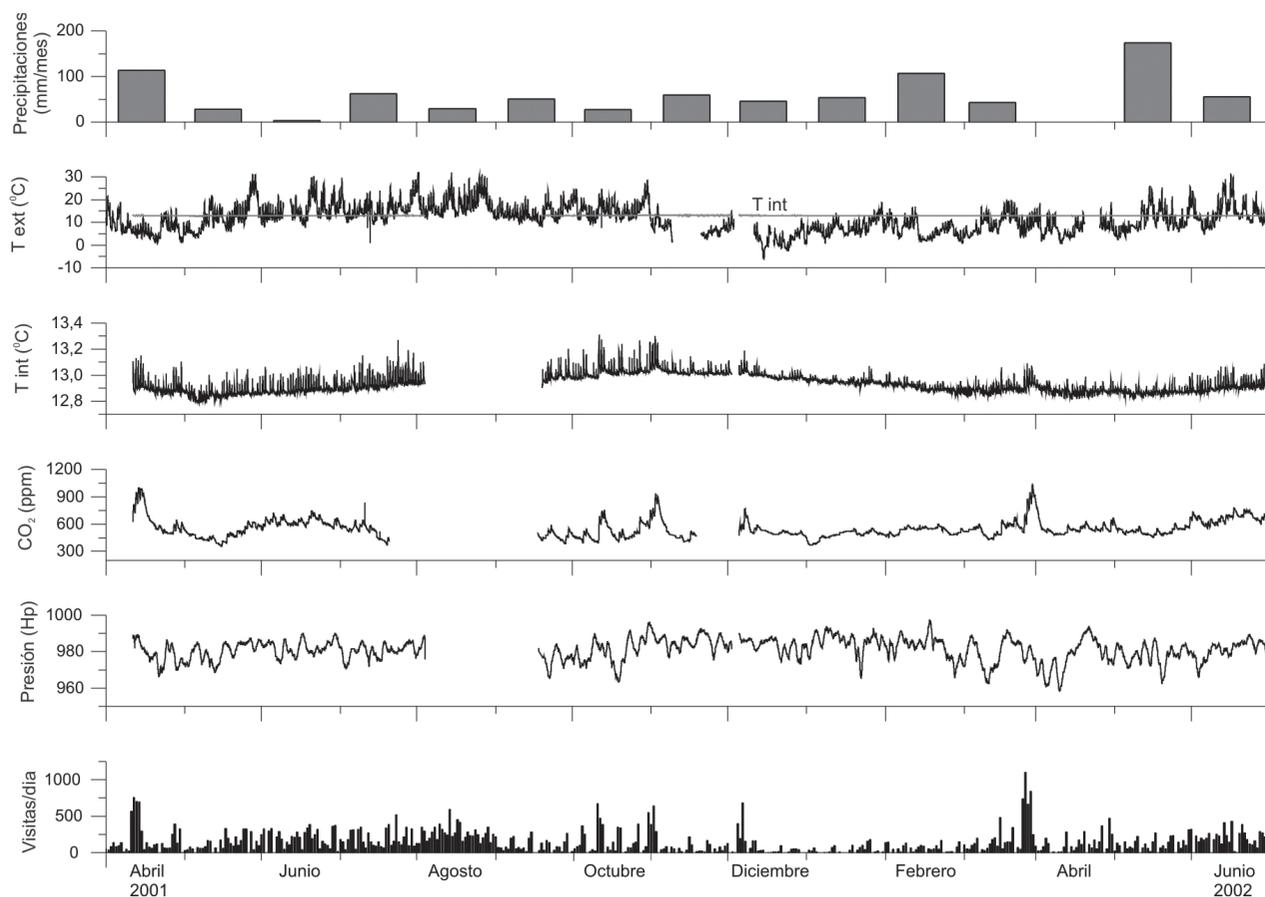


Fig. 3.—Registro de los parámetros microambientales de la cavidad y el exterior, junto con el número diario de visitantes, durante el período de estudio.

cido por la escasa oscilación térmica del sistema, incluso siendo Pozalagua una de las cavidades más próximas a la superficie de un complejo y gran sistema kárstico cuya oscilación microclimática será aún menor. Podría esperarse una leve disminución de la humedad relativa durante los períodos de ligero incremento de la temperatura del aire, pero la existencia de agua kárstica disponible en cantidad suficiente, tanto en Pozalagua como en el resto del sistema, favorecen la conservación del estado de saturación. Además, la entrada de visitantes en la cavidad, con la consiguiente emisión de vapor de agua (a 37 °C) a un sistema térmicamente estable (ca. 13 °C) y saturado en humedad, provoca la inmediata formación de hidroaerosoles y la condensación del agua excedente sobre cualquier soporte existente. Andrieux (1988) estima una emisión de vapor de agua de 0,32 g/minuto por visitante. Asumiendo un tiempo medio de estancia de 45 minutos para los 61.423 visitantes, éstos provocarían la condensación de 882 litros de agua a lo largo

de un ciclo anual sobre los paramentos existentes, incluida la roca encajante y las formaciones de espeleotemas.

Presión atmosférica

La presión atmosférica registrada en el interior de la cavidad, muy similar a la exterior dada su proximidad a la superficie, muestra en conjunto valores estables y moderados en ciclos de largo período (ciclo anual registrado), con algunas oscilaciones relativamente intensas en ciclos de corto período, que pueden implicar fuertes ascensos o descensos diarios. La presión media anual registrada es de 981 Hp con valores mínimos de 958 Hp (abril de 2002) y máximos de 997 Hp (febrero de 2002). Durante el ciclo anual estudiado se han observado etapas de mayor estabilidad, durante el período estival e inicios del invernal, y fases de mayor inestabilidad a finales de invierno y durante la primavera,

entre los meses de febrero y mayo, así como a principios de otoño. Como veremos a continuación la evolución de este parámetro, ajena a la influencia antrópica, y en concreto sus oscilaciones de corto período, pueden influir de forma decisiva en la tasa de renovación de aire y la concentración de CO₂ en el aire de la cueva.

Temperatura del aire interior

La temperatura media anual del aire en la cueva durante el período de estudio es de 12,92 °C. Como se observa en la figura 3, la variación de temperatura está influenciada por el ciclo anual exterior, reflejando un cierto desfase correspondiente a la baja conductividad térmica de la roca encajante de la cavidad, que implica un mayor tiempo de respuesta del sistema kárstico a los cambios térmicos externos. De este modo se observan dos períodos bien diferenciados: seis meses de ascenso térmico (mayo-octubre) y otros seis de descenso térmico (noviembre-abril). La máxima media mensual se sitúa a principios de noviembre (13,05 °C), correspondiente con las altas temperaturas registradas en el exterior durante el verano, y la mínima media mensual en mayo de 2001 (12,86 °C), asociada a las bajas temperaturas externas registradas en el período invernal.

La temperatura máxima del aire de la cueva fue registrada en octubre de 2001 (13,31 °C) y la mínima en mayo de 2001 (12,79 °C). Esto indica un bajo rango de oscilación de la temperatura anual de 0,53 °C, teniendo en cuenta además que esta variación está inducida parcialmente por la entrada de visitantes. Si bien no es posible establecer de forma precisa la magnitud de esa influencia, debido a la ausencia del registro de temperatura de la cavidad en condiciones naturales (es decir, sin visitas), se ha procedido a evaluar dicho efecto a partir del análisis detallado de los datos durante los meses en los que se registraron las máximas temperaturas de la cavidad (octubre-noviembre de 2001). De esta forma, teniendo en cuenta las temperaturas en los períodos nocturnos y los días sin visitas durante los últimos días de octubre y primeros de noviembre, se ha estimado que el rango de variación de la temperatura anual, sustrayendo la influencia de los visitantes, es del orden de 0,25 °C. Del mismo modo, se ha calculado que la máxima temperatura registrada en la cavidad, sin la influencia acumulada de las visitas, estaría por debajo de 13,05 °C. Ese valor se ve superado en numerosas ocasiones a lo largo de todo el año, destacando los meses de octubre y noviembre, durante los cuales se sobrepasa esa cifra casi diariamente.

Además de la modificación directa del rango de oscilación térmica de la cueva, la entrada de visitantes con el actual régimen de visitas influye en el ciclo anual de la cavidad. El hecho de que un período de gran afluencia de visitantes (Semana Santa) coincida con la etapa en la que la temperatura se aproxima a su mínimo natural, provoca la rotura de la tendencia natural de descenso; así, durante ese período, si bien el mínimo alcanzado se acerca al mínimo del año anterior en las mismas fechas, la media diaria queda significativamente por encima que el año anterior (figura 3). Algo muy similar sucede en la época en que la tendencia al ascenso de temperatura del aire cambia para comenzar la etapa de descenso térmico, debido a los puentes del 12 de octubre y 1 de noviembre.

Mediante el cálculo de una regresión lineal de todos los datos de temperatura correspondientes a un ciclo anual completo (12 de abril de 2001 a 12 de abril de 2002) se ha estimado que la cavidad presenta una tendencia a incrementar su temperatura en torno a los 0,04 °C por año. Esta estimación parece confirmarse por el aumento de la temperatura mínima de la cavidad en 2001 (12,79 °C) frente a la de 2002 (12,81 °C). El calentamiento progresivo parece confirmarse tras la observación de los datos de julio de 2002 a julio de 2004, si bien, aún no han sido procesados en forma detallada. Este fenómeno puede ser muy perjudicial para la conservación de la cavidad y debe ser tenido en cuenta para la modificación del régimen de visitas.

Para mostrar los incrementos de temperatura observados diariamente debidos a las visitas, se ha realizado una tabla en la que se ha registrado el incremento producido por una visita el día después al que la cavidad ha estado cerrada o bien el número de visitas que fue menor de cinco personas (tabla 4). De esta forma se observa el incremento neto producido; es decir, sin el peso del efecto acumulativo provocado por varios días continuados de visitas. Lo más destacado de esta tabla es observar cómo el día 12 de octubre de 2001 la entrada de 669 visitantes provocó un incremento neto de 0,33 °C, superior incluso a la oscilación térmica anual estimada para condiciones naturales. Para evaluar el efecto de las visitas en los parámetros microambientales diarios, se ha elegido un período con días sin visitas alternando con días de visitas importantes (> 250 visitas por día), de tal modo que se pueda ver el efecto de dichas visitas y la capacidad de recuperación de la cavidad. Un ejemplo ilustrativo lo constituye el período entre el 3 y 8 de junio de 2001 (figura 4) en el que el posible efecto de las variaciones de la temperatura en el exterior se ve minimizado, ya que permanece estable, respondiendo a los ciclos normales

Tabla 4.—Incrementos de temperatura y CO₂ producido por visitantes el día después al que la cavidad ha estado cerrada o bien el número de visitas fue menor de cinco personas

Día	Visitas	ΔT (°C)	ΔCO ₂ (ppm)
24/04/2001	123	0,119	43
03/05/2001	23	0,07	—
08/05/2001	68	0,111	10
15/05/2001	59	0,07	—
17/05/2001	172	0,134	61
29/05/2001	283	0,133	60
05/06/2001	293	0,153	52
08/06/2001	213	0,113	43
25/09/2001	28	0,082	—
29/09/2001	147	0,158	82
02/10/2001	13	0,126	10
10/10/2001	34	0,116	10
12/10/2001	669	0,329	288
16/10/2001	72	0,094	10
20/10/2001	346	0,198	119
23/10/2001	6	0,032	18
24/10/2001	67	0,127	27
30/10/2001	22	0,047	—
06/11/2001	34	0,07	—
13/11/2001	56	0,113	27
11/12/2001	57	0,035	10
18/12/2001	2	0,017	—
26/12/2001	9	0,036	—
03/01/2002	30	0,055	—
15/01/2002	5	0,028	27
19/01/2002	32	0,05	—
22/01/2002	32	0,033	10
29/01/2002	5	0,022	—
05/02/2002	44	0,035	10
07/02/2002	50	0,056	52
09/02/2002	89	0,087	18
12/02/2002	59	0,046	10
19/02/2002	46	0,061	—
26/02/2002	7	0,032	—
02/03/2002	71	0,09	18
05/03/2002	103	0,067	10
12/03/2002	38	0,087	—
09/04/2002	6	0,055	—
11/04/2002	7	0,074	25
13/04/2002	71	0,1	18
16/04/2002	81	0,123	18
23/04/2002	107	0,065	9
30/04/2002	48	0,04	—
04/06/2002	223	0,141	52
11/06/2002	173	0,112	43

día/noche con un máximo de T_{ext} al mediodía y un mínimo de madrugada.

En relación con la T_{int} de la cavidad se observa claramente cómo los días de visitas (3, 5, 6 y 8 de junio) se produce un incremento importante, pudiéndose incluso distinguir el efecto de los distintos grupos de visitantes. El máximo incremento detectado fue de 0,21 °C (3 de junio), lo que supone un 84% de la variación natural anual (0,25 °C). La

recuperación de los valores previos a la entrada de visitantes se alcanzó después de un período próximo a las 12 h 15 m, similar aunque ligeramente menor al del día 5 de junio (12 h 45 m). Estos valores pueden considerarse como tiempos medios de recuperación de la T_{int} a lo largo de la mayor parte del año. El siguiente día (6 de junio) el tiempo de recuperación es algo mayor (14 h 15 m), mostrando el posible efecto acumulativo que se produce cuando la entrada de visitantes es muy numerosa durante varios días seguidos.

Concentración de CO₂ en el aire interior

La concentración media anual de CO₂ en el aire interior fue de 480 ppm, que puede considerarse como moderadamente baja para una cavidad de estas características. La escasa cobertura vegetal desarrollada sobre la cueva puede ser el origen de estas bajas concentraciones. La pauta de evolución de este parámetro a lo largo del ciclo anual indica que Pozalagua funciona como la cavidad más cercana a la superficie de un sistema kárstico mucho mayor y profundo. Los períodos de mayor concentración natural de CO₂ coinciden con las épocas en las que la T_{ext} comienza su etapa ascendente y se sitúa de forma estable por encima de la T_{int} ; así, los máximos valores medios mensuales se registraron en los meses de junio de 2001 (626 ppm) y 2002 (563 ppm). Esta etapa coincide con una fase de incremento de la presión atmosférica que influye directamente en la acumulación del gas en el interior de la cueva. Tras estos períodos de mayor concentración, los niveles permanecen muy estables y próximos al valor medio de la concentración anual. El mínimo valor se registró en septiembre de 2001, con 302 ppm, y el máximo fue registrado en abril de 2001, con 1.097 ppm; si bien, como se observa en la figura 3, este registro está fuertemente condicionado por las visitas de Semana Santa de ese año, como ocurre a lo largo de todo el ciclo anual con picos significativos en los períodos de gran afluencia de visitantes. Aplicando la misma metodología que para la T_{int} , se ha estimado que el valor máximo de CO₂ en condiciones naturales estaría por debajo de 600 ppm. De este modo, en condiciones naturales, el rango de variación anual sería del orden de las 300 ppm.

Se puede observar cómo la afluencia masiva de visitantes en épocas festivas (Semana Santa, puente de El Pilar, puente de Todos los Santos, puente de la Constitución, etc.) provoca un incremento notable en los valores de CO₂ de la cavidad en esos días, observándose una muy lenta recuperación hacia los niveles naturales. En la tabla 4 puede

verse el incremento producido por la entrada de visitantes el día después al que la cavidad ha estado cerrada o tuvo un número de visitas menor de cinco personas. El máximo aumento detectado en estas condiciones se produjo el día 12 de octubre de 2001 con un incremento provocado por los visitantes de 288 ppm sobre una concentración de base próxima a las 302 ppm. De forma similar al caso de la T_{int} , para valorar e ilustrar el efecto de las visitas diarias en la concentración de CO_2 de la cavidad se ha elegido un período (entre el 3 y el 8 de junio de 2001) en el que existen días sin visitas alternando con días de visitas numerosas (> 250 visitantes por día), de tal modo que se pueda ver su efecto y la capacidad de recuperación de la cavidad de forma neta (figura 4).

Las visitas realizadas (entre 290 y 300 visitantes por día) provocan directamente un incremento neto entre 50 y 100 ppm del CO_2 del aire en la cavidad. La recuperación hasta valores próximos a los existentes antes de la entrada del primer grupo de visitantes no se produce de forma completa durante el siguiente ciclo diario, siendo mayor después de la visita del día 3 de junio (75% en 39 horas), dado que al día siguiente no se realizaron visitas. El día 5 de junio sólo se produce un descenso del 50%, ya que no existe tiempo suficiente para una mayor recuperación, pues al siguiente día entraron nuevamente más de 300 personas. Finalmente, y tras un día sin visitas (7 de junio), se produce una recuperación total de los valores previos (575 ppm) al cabo de 35 horas. Como se ha indicado anteriormente, en esta caída de la concentración de CO_2 influyen las variaciones de la presión atmosférica. Durante los días 6 y 7 de junio tiene lugar un descenso brusco de la presión, que favorece la desgasificación de la cueva. Si la presión atmosférica se hubiese mantenido estable o subiendo, como los días anteriores, probablemente no se hubiese producido la recuperación total de los niveles de CO_2 , dado que es fácilmente observable el efecto acumulativo que provoca la afluencia masiva de visitantes de los días anteriores. Para observar esto podemos partir como referencia del nivel del CO_2 en la cavidad el día 3 de junio antes del inicio de las visitas; es decir, sin influencia de las mismas. Si observamos los niveles de CO_2 en los mismos momentos de los demás días, vemos cómo antes de las visitas del día 5 existe un incremento acumulado de 26 ppm, el día 6 de 51 ppm y el día 7, si bien no hay visitas, en el caso de que se hubiesen realizado comenzarían con un incremento acumulado de 87 ppm. Este efecto acumulativo es aún más acusado en épocas de visitas masivas como Semana Santa de 2002 (figura 4). Durante este período los incrementos directos producidos por las visitas varían entre 185 y 280 ppm

en cada ciclo diario. Como acabamos de comprobar, el período de descanso de 16 horas hasta la siguiente visita (cierre cavidad-apertura día siguiente) no permite en condiciones normales la recuperación total del incremento de CO_2 producido (mínimo 35 horas), por lo que el efecto acumulativo es muy elevado (ca. 400 ppm, lo que significa casi un incremento del 100% en relación con los valores previos a los días de Semana Santa).

La capacidad de recuperación de la atmósfera interior es mucho más lenta para el CO_2 que para la T_{int} . El período de influencia antrópica es similar (ca. 95 horas), pero se requieren cerca de 118 h para su recuperación frente a las 72 horas necesarias para el descenso de la T_{int} . Estos valores, a falta de datos precisos sobre tasa de intercambio de aire con el exterior, pueden considerarse como representativos de un período bueno para la recuperación, pues la temperatura media exterior es inferior a la interior y coinciden con una fase de descenso de la presión, muy acusada desde el 2 de abril.

Caracterización hidroquímica de las aguas kársticas

El agua de infiltración es uno de los principales factores en el equilibrio físico-químico del sistema kárstico. Es el principal agente de transporte de CO_2 al sistema, influyendo asimismo en el resto de los parámetros microclimáticos de la cavidad. Sus características composicionales definen su capacidad para precipitar o disolver los minerales carbonáticos. Cualquier modificación en sus vías y tasas de infiltración o en su composición puede alterar dicho equilibrio favoreciendo la acentuación de los procesos de deterioro.

Con objeto de conocer las características físico-químicas de las aguas que actualmente se infiltran y circulan por la cavidad, se escogieron cinco puntos de goteo cenital y uno del muestreo de agua acumulada en un gour (figura 1).

Los resultados analíticos completos se muestran en la tabla 5 y su representación gráfica en la figura 5. Un aspecto favorable para la conservación de la cavidad es la ausencia de indicios de contaminación de ningún tipo, como muestran los bajos contenidos en nitratos y potasio y la inexistencia de compuestos orgánicos, amoníaco, nitritos, fosfatos y elementos pesados en disolución. Todas las muestras de agua analizadas muestran una composición química bastante homogénea de tipo bicarbonatado cálcico-magnésico de forma coherente con la composición mineralógica de la roca encajante de la cavidad, analizada en el estudio previo; su distribución y variación a lo largo del eje Ca/Mg indica su grado de interacción con calizas (más cálcicas) o

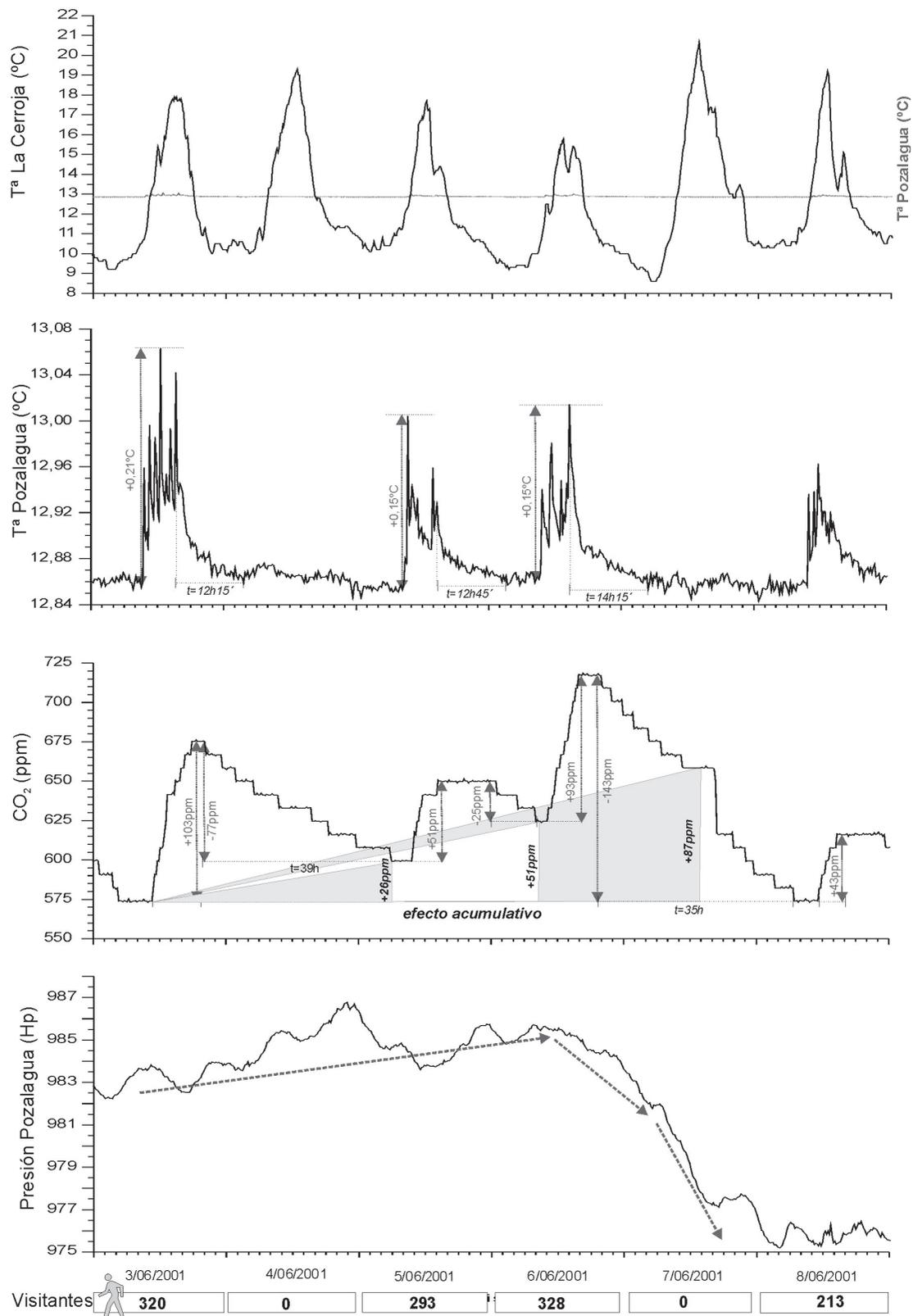


Fig. 4.—Registro microambiental durante el período del 3 al 8 de junio de 2001. Se han incluido los incrementos que provocan las visitas en T y CO₂, así como los tiempos de recuperación de los mismos para alcanzar niveles próximos a los previos a las visitas.

Tabla 5.—Características físico-químicas de las muestras de agua de infiltración y embalsada

Muestra	Fecha	Flujo	T °C	pH	CO ₂	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Fe ²⁺	K ⁺	Si ⁴⁺
PZE-01-1	28/03/01	++++	12,0	8,28	1,41	152,4	—	10,8	5,2	—	33,9	10,8	3,1	0,034	2,5	0,31
PZV-01-1		++	12,0	7,85	5,04	198,2	0,6	4,0	6,0	—	31,0	12,0	3,0	0,020	2,5	0,47
PZGG-01-1		++++	12,1	8,11	2,19	160,2	—	3,0	5,0	—	31,0	14,0	3,0	0,007	1,1	0,46
PZB-01-1		++	12,3	7,46	9,50	152,4	1,0	3,0	5,0	—	33,2	7,4	2,4	—	—	0,22
PZL-01-1		++++	12,1	8,19	1,57	137,2	0,5	4,0	6,0	—	29,5	12,6	2,7	—	—	—
PZGF-01-1		Gour	12,4	8,01	2,55	146,3	0,8	4,0	6,0	—	34,7	8,5	2,4	0,026	—	0,36
PZE-01-2	7/07/01	+	12,1	7,58	7,76	164,6	0,1	12,05	5,7	<0,5	33,8	12,8	4,0	0,052	0,1	—
PZGG-01-2		+	12,2	7,79	4,58	183,0	0,0	3,5	6,0	<0,5	39,2	8,6	5,3	0,020	0,2	—
PZL-01-2		+	12,2	7,73	5,04	151,0	0,1	4,4	5,3	<0,5	22,9	11,8	11,0	0,031	0,1	—
PZGF-01-2		Gour	12,2	7,60	7,24	158,5	1,4	3,4	6,1	<0,5	37,2	10,6	2,6	0,007	0,1	—
PZE-02-1	23/02/02	++++	12,6	7,66	6,02	155,0	0,3	10,0	7,0	—	33,5	10,6	3,4	—	—	—
PZV-02-1		++	12,6	7,71	6,62	192,0	1,3	3,0	6,3	—	36,4	19,9	2,6	—	—	—
PZGG-02-1		++++	13,2	7,82	4,03	151,0	0,5	5,6	9,0	—	34,1	8,8	2,7	—	—	—
PZB-02-1		+++	12,8	7,92	3,37	159,0	0,3	4,6	9,3	—	34,7	8,7	4,5	—	—	—
PZL-02-1		++++	12,6	7,78	4,93	168,0	0,3	5,0	9,4	—	34,1	11,8	5,3	—	—	—
PZGF-02-1		Gour	12,8	7,74	5,12	159,0	0,5	5,9	9,0	—	35,1	8,1	3,5	—	—	—
PZE-02-2	22/05/02	++++	13,8	8,08	2,05	143,0	0,3	9,8	7,1	0,2	25,2	11,6	2,5	0,106	0,1	—
PZV-02-2		++	13,6	8,04	3,06	195,0	1,5	3,0	6,4	0,4	28,4	15,7	2,9	—	0,2	—
PZGG-02-2		+++	13,6	8,18	1,70	150,0	2,0	5,5	6,2	0,3	31,0	8,8	3,6	0,145	0,5	—
PZB-02-2		+++	13,8	8,09	2,33	167,0	0,4	5,0	7,0	0,3	28,5	13,4	2,9	0,110	0,1	—
PZL-02-2		+++	14,0	8,14	1,88	152,0	0,4	5,5	7,2	0,3	26,7	13,0	3,1	0,143	0,1	—
PZGF-02-2		Tour	13,5	8,08	2,32	161,0	1,1	6,0	4,9	0,3	27,2	10,5	3,2	0,124	0,1	—

Concentraciones en ppm. Analizados y no detectados: Pb, Sr, Cd, Ni, Zn, Cu, Mn.

Muestreos: PZE: goteo cenital gran estalagmita pasillo de entrada.

PZV: goteo cenital izq. Sala Versailles.

PZGG: gours con foco sumergido.

PZGF: goteo cenital en tours.

PZB: goteo cenital en El Balcón.

PZL: goteo cenital escalera bajada hacia Sala del Lago.

Flujo: muy bajo = + bajo = ++ medio = +++ alto = ++++ muy alto = +++++

dolomías (mayor contenido en magnesio) en la parte superior del karst, hasta su salida en la cueva.

En general, existe además una relación inversa entre la velocidad de flujo del agua de infiltración y la relación Mg/Ca; un ejemplo claro de esta relación lo constituye el punto de menor tasa de infiltración (PzV goteo cenital Sala Versailles) que mantiene las mayores y más estables proporciones de magnesio a lo largo del ciclo anual. Este proceso es debido a que la cinética de disolución de la dolomita es más lenta que la de la calcita y sólo aguas con un elevado tiempo de contacto con dolomía inducen su disolución efectiva y el consiguiente incremento del Mg en solución.

Los contenidos en el resto de los elementos mayores son, en general, muy homogéneos con pequeñas variaciones debidas a las diferentes vías de percolación para cada uno de los puntos controlados. Destaca el carácter ligeramente más sulfatado del punto PzE, probablemente relacionado con procesos de oxidación de trazas de sulfuros asociados a las dolomías de origen hidrotermal que provocan la formación de fases sulfatado-cálcicas en ambientes kársticos y su posterior disolución por las aguas de infiltración. Asociado a ese mayor contenido en sul-

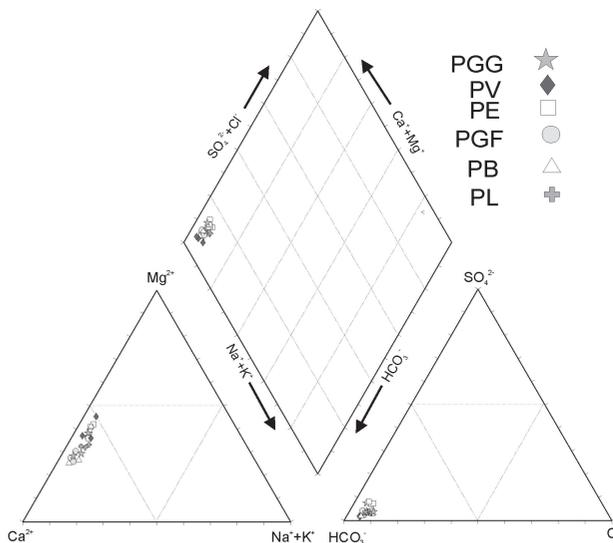


Fig. 5.—Diagrama de Piper modificado de las aguas analizadas.

fatos se observa asimismo un leve enriquecimiento en magnesio como consecuencia de procesos de dedolomitización a pequeña escala.

Tabla 6.—Valores de la presión parcial de CO₂ y de los índices de saturación calculados a partir de los datos físico-químicos de las muestras de agua

Fecha	Muestra	Tipo	log Pco ₂ (atm)	INDICES SATURACION			
				Aragonito	Calcita	Dolomita	Magnesita
28/03/2001 log Pco ₂ aire -3,39	PZE-01-1		-3,19	0,11	0,31	0,42	-0,68
	PZV-01-1		-2,64	-0,23	-0,03	-0,19	-0,94
	PZG-01-1	Goteos	-3,00	-0,03	0,17	0,25	-0,72
	PZB-01-1		-2,36	-0,68	-0,49	-1,33	-1,64
	PZL-01-1		-3,15	0,03	0,23	0,18	-0,74
	PZGF-01-1	Media goteos → Gour	-2,87 -2,93	-0,18 -0,14	0,02 0,06	-0,13 -0,20	-0,94 -1,05
7/07/2001 log Pco ₂ aire -3,28	PZE-01-2		-2,45	-0,54	-0,35	-0,82	-1,27
	PZG-01-2	Goteos	-2,68	-0,28	-0,08	-0,53	-1,24
	PZL-01-2		-2,64	-0,59	-0,39	-0,77	-1,18
		Media goteos →	-2,59	-0,47	-0,27	-0,71	-1,23
	PZGF-01-2	Gour	-2,48	-0,49	-0,29	-0,84	-1,34
23/02/2002 log Pco ₂ aire -3,40	PZE-02-1		-2,55	-0,48	-0,28	-0,76	-1,28
	PZV-02-1		-2,51	-0,31	-0,11	-0,34	-1,03
	PZG-02-1	Goteos	-2,72	-0,31	-0,11	-0,50	-1,19
	PZB-02-1		-2,80	-0,19	0,01	-0,28	-1,09
	PZL-02-1		-2,64	-0,32	-0,12	-0,41	-1,08
	PZGF-02-1	Media goteos → Gour	-2,65 -2,62	-0,32 -0,36	-0,13 -0,17	-0,46 -0,66	-1,13 -1,29
22/05/2002 log Pco ₂ aire -3,40	PZE-02-2		-3,01	-0,20	0,00	-0,02	-0,82
	PZV-02-2		-2,83	-0,07	0,13	0,32	-0,61
	PZG-02-2	Goteos	-3,09	0,01	0,20	0,18	-0,83
	PZB-02-2		-2,95	-0,07	0,12	0,24	-0,69
	PZL-02-2		-3,04	-0,09	0,11	0,23	-0,68
	PZGF-02-2	Media goteos →	-2,98 -2,96	-0,08 -0,12	0,11 0,08	0,19 0,06	-0,72 -0,82

La morfología característica de las helictitas se debe a que en su formación el componente de crecimiento cristalino prevalece sobre las fuerzas hidráulicas del agua controladas por la gravedad. Esto implica, entre otros factores, que el flujo de agua para formarse estos depósitos debe ser lo suficientemente lento como para no producir goteos. Este hecho se ve confirmado a simple vista en la cueva, ya que la mayor abundancia de excéntricas activas se asocia a puntos donde actualmente la velocidad de goteo del agua de percolación es muy lenta. En este sentido, los datos de los que disponemos proceden de los puntos donde, a pesar de existir un bajo caudal, éste era lo suficientemente elevado como para realizar la toma de muestra en el período de dos días, si bien existen numerosos puntos de percolación de agua asociados a zonas con gran desarrollo de excéntricas en los que las tasas de infiltración son significativamente más lentas. Estos puntos presentan especiales características hidroquímicas, basadas esencialmente en altos valores de Pco₂ en comparación con las muestras de goteos de flujo más rápido (véanse las tablas 6 y 7). En este mismo

sentido, los valores más altos de Pco₂ en agua se obtuvieron en los momentos de menor flujo de entrada (julio de 2001) y esto suele unirse a un mayor grado de mineralización y a un mayor desequilibrio con la Pco₂ en el aire de la cavidad. Como se verá más adelante, este hecho coincide con la época en la que se alcanzan los valores más altos en la concentración de CO₂ en el aire de la cueva, ya que el agua es el principal vehículo de transporte de este gas a la atmósfera de la cueva. Al surgir a la cavidad sufre un proceso de desgasificación parcial del CO₂ que lleva en disolución, debido tanto a procesos mecánicos (impacto de las gotas al caer) como a mecanismos de difusión y equilibrio con la atmósfera de la cueva.

Las muestras de agua con un mayor tiempo de residencia en la cueva deben encontrarse prácticamente en equilibrio con la Pco₂ del aire en el momento del muestreo. Sin embargo, un hecho ya indicado en anteriores informes y confirmado ahora consiste en que las aguas acumuladas en los *gours* iluminados muestran el efecto de dicha iluminación subacuática. Este fenómeno se muestra

con claridad en la tabla 5 al contrastar los valores entre la P_{CO_2} de la muestra PzG (goteo sobre *gour* iluminado) y la PzGF (*gour* foco). Además de la colonización por microorganismos desarrollada en los focos y en las zonas de roca directamente afectadas por el haz de luz, el aumento de la temperatura que provoca la bombilla, favorece el incremento de la P_{CO_2} y, por tanto, una mayor desgasificación en la zona de contacto. La homogeneización del agua mediante difusión provoca que el agua acumulada y más alejada de los focos de luz rebaje su contenido en CO_2 disuelto y de esa forma se favorezca la precipitación de calcitas flotantes en todos los *gours* iluminados, si bien el verdadero problema consiste en la aparición de las colonias microbiológicas fototrópicas que puedan servir de base para la llegada y desarrollo de otras comunidades quimiótrofas.

En cuanto al estado de saturación de las muestras de agua frente a los principales minerales carbonáticos, destaca la proximidad del conjunto de las muestras analizadas al estado de equilibrio respecto a la calcita (principal componente mineral de las excéntricas).

La lenta velocidad de percolación permite un mayor período de contacto entre el agua que surge a la cavidad y la atmósfera interior, favoreciendo la precipitación mineral e impidiendo que el agua alcance un mayor grado de sobresaturación. Esto, unido al desequilibrio existente entre la P_{CO_2} de las aguas de infiltración y la del aire de la cavidad, favorece la formación de espeleotemas de crecimiento lento. El estado de saturación es similar respecto a las fases carbonatado cálcico-magnésicas (dolomita), aunque con ligera subsaturación, especialmente en los muestreos de julio y febrero.

En la parte externa y superior del karst predominan los procesos de disolución de calizas y dolomías, mientras en el interior de la cavidad prevalecen los procesos de precipitación mineral. Estos resultados son totalmente coherentes con el alto grado de desarrollo de espeleotemas en toda la cueva, así como con la composición mineralógica de la roca encajante y de los propios espeleotemas de la cavidad.

Discusión: influencia de las visitas en el microambiente y cálculo de la capacidad de carga de la cavidad

El concepto de la capacidad de carga (o de visita) en una cavidad es esencial para la gestión de ésta, si bien ha sido puesto de manifiesto por diferentes autores la dificultad de cuantificarla debido a la cantidad de parámetros que influyen en ella

(Middaught, 1977; Hammitt y Cole, 1987; Huppert *et al.*, 1993; Hoyos *et al.*, 1998).

Heaton (1986) y Cigna (1993) agrupan los sistemas kársticos, desde el punto de vista de transferencia de energía y masa, enfocado a la gestión y protección de cavidades, en tres categorías: cavidades con alta energía (el flujo de energía creado en condiciones naturales en el sistema es mayor que el generado por visitas a la cueva); cavidades de energía intermedia (ambos flujos de energía son similares); cavidades de baja energía (el flujo de energía creado por los visitantes es mayor que el flujo natural de la cavidad). Claramente, estas dos últimas categorías de cavidades son las que pueden estar más influenciadas por la acción humana y, por tanto, deben ser objeto de medidas que minimicen el efecto causado por las visitas.

El microclima de la cavidad está determinado por la interacción de numerosos factores internos y externos. La alteración de las condiciones microambientales naturales de las cavidades trae como consecuencia la rotura del equilibrio dinámico natural del sistema kárstico. Las diferentes modificaciones antrópicas introducidas en el sistema, tanto por las actividades desarrolladas en el exterior como las introducidas en el ambiente kárstico, provocan el desarrollo e incremento de los procesos de alteración de dicho equilibrio.

La formación de excéntricas (principal atractivo de la cavidad) está relacionada directamente con la confluencia de diversos factores (Hill y Forti, 1997): bajas velocidades de infiltración del agua, composición química del agua de infiltración (y, por tanto, con la naturaleza de la roca encajante de la cavidad) y con el equilibrio físico-químico que se establece entre la atmósfera de la cavidad y el agua de infiltración. Es en este último aspecto en el que influye directamente la entrada de visitantes a la cueva mediante emisión de calor, vapor de agua y CO_2 , a través de la piel y durante la respiración. Todas las variaciones producidas afectan al equilibrio del sistema y en especial juegan un papel fundamental en el progreso de la colonización de dicho soporte por comunidades microbiológicas y en el desarrollo de procesos de corrosión de la roca soporte y espeleotemas.

En función de lo anterior, la modificación del actual régimen de visitas debe procurar que las alteraciones producidas por la entrada de visitantes en los parámetros, no rompan dicho equilibrio, sin olvidar que en cualquier caso lo óptimo sería la ausencia total de perturbaciones antrópicas. Para ello se procede al cálculo de la capacidad de visita o capacidad de carga de la cueva, número máximo de visitantes por día para que no se produzca un deterioro microambiental irreversible.

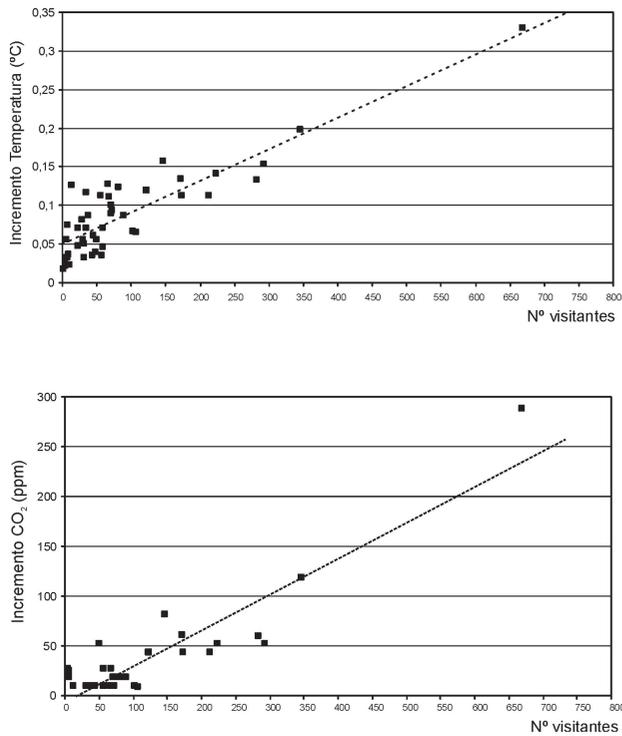


Fig. 6.—Incremento de temperatura y CO₂ en la cavidad en función del número de visitantes.

Factor limitante T_{int}

En la figura 6 se muestra la relación directa entre el número de visitantes diarios y el incremento neto de la temperatura del aire interior (tabla 4), prescindiendo de los efectos acumulativos que podrían darse en épocas de afluencia masiva. Como puede verse, se produce una gran dispersión de datos para valores bajos del número de visitantes, pero, sin embargo, la correlación mejora considerablemente cuando el número es superior a 100 visitantes. Este efecto puede deberse a que los días con pocos visitantes los tiempos de permanencia en la Sala Versalles pueden variar mucho, en tanto que los días de gran afluencia el control de los tiempos de visita se hace más riguroso. La recta de correlación obtenida nos permite predecir con cierta confianza el incremento de T_{int} producido por grupos entre 100 y 700 visitantes.

Se ha constatado que la máxima temperatura registrada en la cavidad sin la influencia acumulada de las visitas estaría por debajo de 13,05 °C. Por tanto, el nuevo régimen de visitas debería impedir que se superase esa temperatura y con ello mantener en la medida de lo posible la oscilación térmica natural de un ciclo anual. Como se ha comprobado, esta temperatura se supera en numerosas ocasiones

Tabla 7.—Máximo número de visitantes por día para cada mes según factor limitante T_{int}

Mes	T media (°C)	Incremento máximo aconsejable ^(a)	N.º máximo visitantes/día ^(b)
Mayo 2001	12,86	0,19	362
Junio 2001	12,89	0,16	282
Julio 2001	12,92	0,13	214
Agosto 2001	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Septiembre 2001	12,99	0,06	24
Octubre 2001	13,02	0,03	0
Noviembre 2001	13,05	0,00	0
Diciembre 2001	13,00	0,05	7
Enero 2002	12,95	0,10	131
Febrero 2002	12,91	0,14	224
Marzo 2002	12,89	0,16	271
Abril 2002	12,88	0,17	305
Mayo 2002	12,87	0,18	330
Junio 2002	12,91	0,14	230

a = 13,05 °C – media

b = (a – 0,0492/0,004)

y especialmente durante el período octubre-noviembre. Partiendo de la temperatura media en la cavidad durante cada mes registrado, el criterio limitante consiste en que no se rebase dicha temperatura máxima natural estimada. Para el mes de junio, con una T_{int} media de 12,89 °C, el número de visitantes quedaría limitado a 275 diarios que generarían un incremento máximo de T_{int} de 0,16 °C. En el mes de julio con 12,91 °C de temperatura media, el incremento máximo de la temperatura sería de 0,14 °C, por lo que las visitas deberían limitarse a 225 diarias. Lamentablemente, el mes de agosto y septiembre no están registrados, pero claramente el incremento permitido sería inferior y con eso el número de visitantes recomendados. Como se ha comentado, en el mes de octubre cualquier visita hace incrementar la temperatura por encima de lo recomendado, por lo que podría pensarse en el cierre o en una apertura restringida (ej.: fines de semana) no sobrepasando los 100 visitantes al día. En función de este criterio se ha elaborado la tabla 7, en la que se reflejan los datos del máximo número de visitantes por día para cada mes.

El procesado de los datos de julio de 2002 a julio de 2004 permitiría ajustar aún más la propuesta, ya que la primera revisión llevada a cabo parece corroborar la tendencia al calentamiento de la cueva.

Factor limitante CO₂

El máximo valor de la concentración de CO₂ en aire en condiciones naturales ha sido fijado por

Tabla 8.—Máximo número de visitantes por día para cada mes según factor limitante CO₂

Mes	CO ₂ media (ppm)	Incremento máximo permitido ^(a)	N.º máximo visitas diarias ^(b)
Mayo 2001	484	116	311
Junio 2001	626	0	0
Julio 2001	533	67	176
Agosto 2001	Sin datos	Sin datos	Sin datos
Septiembre 2001	376	224	614
Octubre 2001	409	191	522
Noviembre 2001	482	118	318
Diciembre 2001	429	171	467
Enero 2002	391	209	573
Febrero 2002	430	170	464
Marzo 2002	463	137	370
Abril 2002	460	140	380
Mayo 2002	425	175	477
Junio 2002	563	37	90

a = 600 ppm-media

b = (c-4,7289/0,3567)

debajo de 600 ppm. Siguiendo el mismo criterio que para la T_{int} , el criterio limitante consiste en que el régimen de visitas no provoque la superación de esos niveles de CO₂. En la figura 6 se muestra la relación directa entre el número de visitantes diarios y el incremento neto de la concentración de CO₂ en aire (tabla 4) prescindiendo de los efectos acumulativos que podrían darse en épocas de afluencia masiva. En este caso, la correlación mejora respecto a la de la T_{int} . La recta de correlación obtenida nos permite predecir con cierta confianza el incremento de CO₂ producido por 100 a 700 visitantes por día.

De forma similar a los cálculos realizados para la T_{int} , los datos del máximo de visitantes por día para cada mes, teniendo en cuenta el factor limitante (no superar 600 ppm), se muestran en la tabla 8.

Factores limitantes T_{int} y CO₂

Mediante la combinación de los dos factores limitantes y, en cada caso, tomando como criterio el resultado más restrictivo, se ha elaborado la tabla 9 en la que se muestra el número máximo de visitantes por día recomendados para cada mes. No se dispone de datos para el mes de agosto. En el caso de los meses de mayo y junio se ha optado por el número máximo obtenido para el año 2002.

Los resultados de esta tabla deben ser interpretados con cierta reserva, ya que los datos microambientales obtenidos para el ciclo anual están afectados por la propia entrada de visitantes, y no se conocen los verdaderos valores naturales.

Tabla 9.—Número máximo de visitantes por día recomendados para cada mes

Mes	Máximo visitantes/día. Factor limitante T_{int}	Máximo visitantes/día. Factor limitante CO ₂	Combinación de factores limitantes. Máximo visitantes/día
Enero	131	573	131
Febrero	224	464	224
Marzo	271	370	271
Abril	305	380	305
Mayo	330	477	330
Junio	230	90	90
Julio	214	176	176
Agosto	Sin datos	Sin datos	—
Septiembre	24	614	24
Octubre	0	522	0
Noviembre	0	318	0
Diciembre	7	467	7

Conclusiones

La Cueva de Pozalagua forma parte de un sistema kárstico de amplias dimensiones, representando la zona más somera del sector vadoso del sistema. Los estudios geoquímicos, mineralógicos y petrográficos indican que está desarrollada en litología carbonatada (calizas y dolomías). A partir de los estudios realizados se desprende que la dolomitización podría deberse a un proceso de hidrotermalismo y que el contacto entre la brecha dolomítica y la caliza puede ser el condicionante de la espeleogénesis (formación de cavidades). El estudio de las formaciones espeleotémicas (helictitas, coladas, cortezas), predominantemente calcíticas, denota una primera fase de crecimiento de mineralogía cálcico-magnésica (calcita y dolomita) y/o un recrecimiento y calcitización de fases cementantes secundarias dolomíticas hidrotermales.

La hidroquímica de las aguas de infiltración responde a la litología por la que discurren. En relación con la aparición de espeleotemas tipo «excéntrica» o helictitas, singularidad principal de esta cavidad, parece confirmarse que el tipo de flujo de aguas y su composición está relacionada con su formación. En general, las áreas con mayor abundancia de este tipo de espeleotemas se asocia con zonas en las que el flujo de aguas es muy bajo (goteos muy lentos) y en los que la relación Mg/Ca es mayor. Este proceso es debido a que la cinética de disolución de la dolomita es más lenta que la de la calcita y sólo aguas con un elevado tiempo de contacto con dolomía inducen su disolu-

Tabla 10.—Propuesta de régimen de visitas a la cavidad

Mes	Máximo visitantes/día
Enero	125
Febrero	225
Marzo	275
Abril	300
Mayo	330
Junio	90
Julio	175
Agosto	50
Septiembre	50
Octubre	0
Noviembre	0
Diciembre	50

ción efectiva y el consiguiente incremento del Mg en solución.

En cuanto a la influencia del actual régimen de visitas sobre las características hidroquímicas naturales de las aguas kársticas, todos los datos de que disponemos en este sentido están afectados por él de forma que no es posible determinar y cuantificar exactamente el efecto producido. No obstante, a partir de los datos físico-químicos y del estado de saturación mineral, se puede concluir que el rango de variación inducido por los visitantes en la T_{int} y la concentración de CO_2 no causarían cambios apreciables en el estado de saturación mineral de las aguas de infiltración analizadas. Las ligeras variaciones del estado de saturación que implican los cambios detectados no conllevarían una modificación significativa de las tasas de formación de espeleotemas en los puntos controlados, dado el fuerte desequilibrio existente entre la P_{CO_2} de las aguas de infiltración frente a la P_{CO_2} del aire interior. Únicamente los goteos de flujo muy lento podrían verse afectados por los procesos de condensación asociados a la emisión de vapor de agua por parte de los visitantes. Dicha condensación (882 litros) produciría la dilución de la solución en puntos de goteo con flujo muy lento y, unido al incremento de CO_2 asociado a las visitas, provocar el cese de la precipitación mineral en dichos puntos. Asimismo, podría tener lugar un fenómeno de microcorrosión en las excéntricas más jóvenes y cambios posteriores en la dirección de crecimiento.

Tras el estudio y procesado de todos los datos obtenidos en el período de registro, se concluye que Pozalagua presenta en condiciones naturales una alta estabilidad térmica anual (0,25 °C) comparada con otras cavidades someras situadas en latitudes similares como la Cueva de Altamira (1,6 °C; Sánchez-Moral *et al.*, 1999). La entrada de visitantes produce, en algunas ocasiones, incrementos de la temperatura del aire por encima de dicha oscilación natural

en un ciclo anual. Asimismo muestra una concentración media anual de CO_2 en el aire interior moderadamente baja (480 ppm) con un rango de variación anual del orden de las 300 ppm (Altamira: media 2.750 ppm, oscilación 5.000 ppm). Los tiempos de recuperación para que T_{int} (12 horas) y CO_2 (35 horas) vuelvan a los valores previos a los de la entrada de visitantes de un día bajo condiciones normales son igualmente elevados (Altamira: T_{int} : 2 horas y CO_2 : 18 horas). Estas características indican un alto grado de aislamiento frente a las condiciones externas que hace que cualquier modificación que se provoque en su interior pueda permanecer y acumularse en el tiempo y con ello modificar el frágil equilibrio físico-químico del sistema (confirmado por la leve tendencia al calentamiento detectada).

Los estudios realizados permiten hacer una propuesta de modificación del actual régimen y condiciones de visita. Además del número y distribución de los visitantes por día calculado en función de criterios limitantes para los niveles de T_{int} y CO_2 (capacidad de carga de la cavidad), la propuesta definitiva de modificación del régimen de visitas conlleva cambios en las condiciones de la cavidad que pueden ayudar al incremento de dicha capacidad de carga. La modificación está encaminada a la disminución de los incrementos de CO_2 , T_{int} y humedad provocados por los visitantes, así como del efecto acumulativo y del tiempo necesario para la recuperación de los niveles previos a las visitas.

Las recomendaciones definitivas para la modificación del régimen y condiciones de visita, tras ajustar los valores de la tabla 9, son las siguientes (tabla 10):

1. Reducción del tiempo de permanencia en el interior a 30 minutos máximo e incremento del intervalo de descanso a 30 minutos.
2. Cierre estricto durante un día a la semana y dos tras fechas de gran afluencia de visitantes
Todas las semanas la cueva debe disfrutar, al menos, de un día sin visitas de manera estricta, incluyéndose los períodos vacacionales.
3. Apagado de la iluminación entre grupos y cambio del sistema de encendido total a encendido por tramos.
4. Ajuste del máximo número de visitantes por día para cada mes.

A falta de datos completos para los meses de agosto y diciembre, el número máximo por día (50) se ha calculado teniendo en cuenta el mes anterior y posterior en cada caso, y contrastando los posibles efectos que produciría. Se recomienda el cierre de la cavidad después del período estival (octubre/noviembre) o en su defecto la apertura sólo los fines de semana sin superar los 100 visitantes diarios.

Estas medidas son susceptibles de sufrir modificaciones, dado que la aplicación de las mismas debería minimizar el impacto de las visitas y, por tanto, con el seguimiento de la evolución de los parámetros microambientales, se podría ir ajustando o modificando alguna de estas propuestas. La realización de nuevas actuaciones en la cavidad (cambios del sistema de iluminación, cierre de accesos, cambios en la ventilación de la misma...) pueden modificar drásticamente la situación actual y, por tanto, la aplicación de estas medidas deberían revisarse tras el estudio de los cambios que dichas actuaciones pudiesen provocar en el microambiente de la cavidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración prestada por la empresa CiRN, en especial José Antonio Zuazo, y por los guías de la cavidad. Este trabajo ha sido realizado a través de un Convenio CiRN-UCLM. Es una contribución al Proyecto BTE2002-04492-CO2-02 y al Proyecto IGCP 513.

Referencias

- Agirrezabala, L. L. y García-Mondéjar, J. (2001). Kinematic indicators and mineralization on the Elgoibar fault (Basque-Cantabrian Basin). *Geogaceta*, 30: 7-10.
- Álvarez Ortega, A. (1999). *Valle de Carranza: Pozalagua, Torca del Carlista y Venta Laperra*. Ayuntamiento del Valle de Carranza, 76 pp.
- Andrieux, C. (1974). Premier résultats sur l'étude du climat de la salle des peintures de la galerie Clustres (Niaux-Ariège). *Annales de Spéléologie*, 29: 3-25.
- Andrieux, C. (1988). Influence de l'homme sur l'environnement climatique souterrain. *Actes Journées Félix Trombe*, T-1. 98-122.
- Aramburu, A., Fernández-Mendiola, P. A., López-Horgue, M. A. y García-Mondéjar, J. (2002). Syntectonic hydrothermal calcite in a faulted carbonate platform margin (Albian of Jorrios, northern Spain). *Sedimentology*, 49: 875-890.
- Cañaveras, J. C., Hoyos, M., Sánchez-Moral, S., Sanz-Rubio, E., Bedoya, J., Soler, V., Laiz, L., Groth, I., Schumann, P., González, I. y Saiz-Jiménez, C. (1999). Microbial communities associated to hydromagnesite and needle-fiber aragonite deposits in a karstic cave (Altamira, Spain). *Geomicrobiology Journal*, 16: 9-25.
- Cigna, A. A. (1993). Environmental management of tourist caves. *Environmental Geology*, 21: 173-180.
- Ek, C., Gewalt, M. (1985). Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 173-187.
- Fernández-Mendiola, P. A. y García-Mondéjar, J. (2003). Carbonate platform growth influenced by contemporaneous basaltic intrusions (Albian of Larrano, Spain). *Sedimentology*, 50: 1-18.
- Fernández, P. L., Gutiérrez, I., Quindós, L. S., Soto, J. y Villar, E. (1986). Natural ventilation of the Paintings Room in the Altamira cave. *Nature*, 321 (6070): 586-588.
- Hammit, W., Cole, D. (1987). *Wildland recreation: ecology and management*. Wiley Interscience, New York.
- Heaton, T. (1986). Caves: a tremendous range of energy environments on Earth. *Natl Speleol Soc News*, 301-304.
- Hill, C., Forti, P. (1997). *Cave minerals of the World*. National Speleological Society, 463 pp.
- Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J. C., Sánchez-Moral, S. y Sanz-Rubio, E. (1998). Micro-climatic characterization of a karst system. Human impact on micro-environmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, Spain). *Environmental Geology*, 33: 231-242.
- Huppert, G., Burri, E., Forti, P., Cigna, A. A. (1993). Effects of tourist development on caves and karst. In: P. W. Williams (ed.): Karst terrains. *Environmental changes and human impact. Catena Supplement*, 25: 251-268.
- I.G.M.E. (1978). Mapa Geológico de España, escala 1:50.000, Hoja 60, Valmaseda.
- Liñán, C., Calaforra, J. M., Cañaveras, J. C., Carrasco, F., Fernández Cortés, A., Jiménez-Sánchez, M., Martín Rosales, W., Sánchez Martos, F., Soler, V., Vadillo, I. (2004). Experiencias de monitorización medioambiental en cavidades turísticas. En: Andreo, B., Durán, J. J. (eds.). *Investigaciones en sistemas kársticos españoles*. Publicaciones del IGME, Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 12: 385-429.
- Middaugh, G. (1977). Practical experiences with carrying capacity. *National Cave Management Symposium*, 26-29 Oct., 1976. *Proceedings*, Spelobooks, Albuquerque, N.M. 6-8.
- Plummer, L. N., Parkhurst, D. L., Fleming, G. W., Dunkle, S. A. (1988). PHRQPITZ, a computer program incorporating Pitzer's equations for calculation of geochemical reactions in brines. *U.S. Geol. Surv. Water Resour. Invest.* 88-4153, 310 pp.
- Sánchez-Moral, S., Soler, V., Cañaveras, J. C., Sanz, E., Van Grieken, R., Gysells, K. (1999). Inorganic deterioration affecting Altamira Cave. Quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors. *Science of the Total Environment*, 243: 67-84.
- Ugarte Elorza, F. M. (1989). Geomorfología de las unidades kársticas situadas en los montes vascos. En: J. J. Durán y J. López-Martínez (eds.): *El Karst en España. Monografía*, 4. Soc. Esp. Geomorfología, 121-130.
- Villar, E., Bonet, A., Díaz-Caneja, B., Fernández, P. L., Gutiérrez, I., Quindós, L. S., Solana, J. R. y Soto, J. (1984). Influencia de la presencia de personas sobre los procesos de deterioro de las pinturas de Altamira. Criterios de Conservación. *Monografía del C.I.M. de Altamira*, 11. Ministerio de Cultura, 95-110.
- Wilkening, M. H., Watkins, D. E. (1976). Air exchange and ²²²Rn concentrations in the Carlsbad caverns. *Health Physics*, 31: 139-145.

Recibido el 2 de marzo de 2005
Aceptado el 7 de abril de 2005