

Los estudios científicos como herramienta para la conservación y gestión del Monumento Natural Cueva de Castañar (Extremadura)

P. MUÑOZ BARCO¹, A. M. ALONSO-ZARZA², S. SÁNCHEZ-MORAL³,
E. MARTÍNEZ FLORES¹, S. CUEZVA³, I. GIL-PEÑA⁴, J. LARIO^{3Y5}
y A. MARTÍN-PÉREZ²

¹ Dirección General de Medio Ambiente. Consejería de Agricultura y Medio Ambiente. Junta de Extremadura. Avda. de Portugal, s/n, 06800 Mérida.

² Dpto. Petrología y Geoquímica. Fac. CC. Geológicas-IGE. CSIC-Universidad Complutense. 28040 Madrid.

³ Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC). Dpto. Geología. José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

⁴ IGME. Área de Estudios Geológicos. c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

⁵ Dpto. de Ciencias Analíticas. Facultad de Ciencias-UNED C/ Senda del Rey, 9. 28040 Madrid.

Resumen: La Cueva de Castañar, la cavidad con mayor abundancia de espeleotemas de aragonito de España, fue declarada Monumento Natural en el año 1997. Además de estos espeleotemas hay que resaltar la presencia de carbonatos magnésicos. Por ello, la Cueva de Castañar debe considerarse como un laboratorio natural. La cueva presenta un microclima estable y un bajo intercambio energético con el exterior. La oscilación térmica anual de la temperatura del aire es inferior a 0,1°C. Un sistema tan estable es muy frágil ante cualquier perturbación microambiental. Por ello, la entrada de visitantes debe ser mínima y muy controlada. Los resultados de los estudios están permitiendo establecer la estrategia de conservación del Monumento Natural.

Palabras clave: Monumento Natural, Cueva de Castañar, Extremadura, Estudios medio-ambientales, aragonito, carbonatos magnésicos.

Abstract: The Castañar de Ibor Cave (Extremadura, W Spain), contains a wide variety of aragonite speleothems, and so was considered as a Natural Monument in 1997. The formation of magnesium-rich carbonates, together with the wide presence of calcite and aragonite, allow considering the cave as a natural laboratory. The cave shows a stable microclimate with a low energetic change with the exterior. The mean annual oscillation in air temperature is less than 0.1°C. All these indicating a very stable system but very fragile if a microclimatic change occurs. Thus, the entrance of visitors should be minimum and under strict controls. The results of the studies carried out on the cave outline the strategy for the conservation of the Natural Monument and its use.

Key Words: Natural Monument, Castañar Cave, Extremadura, environmental studies, aragonite, magnesium-rich carbonates.

La Cueva de Castañar, situada en la localidad cacereña de Castañar de Ibor, fue hallada fortuitamente en 1967 cuando un vecino que realizaba tareas agrícolas vio como las patas del animal que utilizaba para estos trabajos se hundían dentro de las tierras de labor. Esto dejó al descubierto una cavidad con un impresionante y muy frágil universo de espeleotemas, de formas de

gran belleza extremadamente finas y delicadas y colores claros que contrastan con los tonos rojizos y oscuros de las pizarras y arcillas que los rodean, haciendo destacar aún más la belleza de las formaciones kársticas. La fragilidad de sus formaciones y el riesgo de alteración y destrucción de las mismas por visitas indiscriminadas, dio lugar a su declaración como espacio

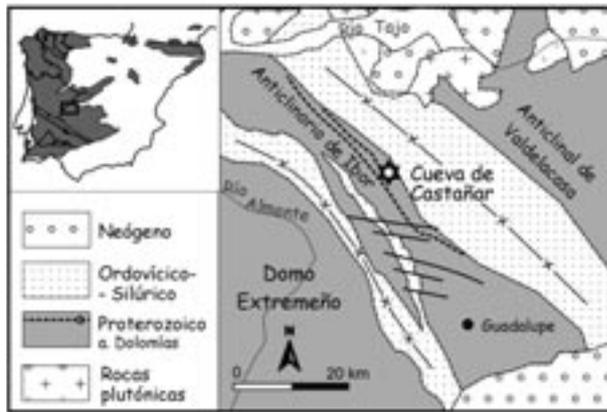


Figura 1. Situación y contexto geológico de la Cueva de Castañar de Ibor.

natural protegido en el año 1997 con la figura de Monumento Natural.

Desde su declaración como Monumento Natural, la cueva es visitable en un régimen experimental con objeto de garantizar que las visitas no afecten a la conservación de los espeleotemas y alteren los procesos geológicos que dan origen a las formaciones y mantienen el equilibrio físico-químico del espacio. La Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Extremadura tiene en marcha desde el año 2003 dos convenios de colaboración para el estudio del Monumento Natural "Cueva de Castañar". La Universidad Complutense de Madrid lleva a cabo el estudio de los espeleotemas y el Museo Nacional de Ciencias Naturales-Consejo Superior de Investigaciones Científicas el registro y análisis de las condiciones microambientales, hidrogeoquímicas y de conservación del Monumento Natural. Entre los objetivos de estos estudios se encuentra el de profundizar en el conocimiento de la cueva así como contribuir a la conservación de ésta a través de una serie de recomendaciones para su gestión.

Contexto Geológico

La cueva se localiza en la comarca de Los Ibores, región que se sitúa en el sector suroriental de la Zona Centroeuropea, en un dominio caracterizado por el desarrollo de pliegues verticales (Díez Balda y Vegas, 1992) entre los que destacan los anticlinales de Valdelacasa e Ibor, de dirección NW-SE (Fig. 1). En el núcleo de estos anticlinales afloran materiales de naturaleza principalmente pizarroso-grauváquica de edad Neoproterozoico-Cámbrico inferior, mientras que en los sinclinales desarrollados entre ellos aflora la serie de cuarcitas y pizarras del Ordovícico-Silúrico. El contacto entre estos dos conjuntos es de tipo discordante, faltando toda la serie correspondiente al Cámbrico medio y superior.

La cueva se desarrolla en los materiales del Neoproterozoico-Cámbrico inferior que afloran en el anticlinal de Ibor. Estos materiales pertenecen a lo que ha sido definido como Grupo Ibor (Álvarez Nava et al., 1988) y están constituidos por una serie de pizarras y areniscas en la que se intercalan algunos niveles dolomíticos de unos 2 m de potencia, así como grauvacas y limolitas. Todos estos materiales están muy bien estratificados y laminados. Las pizarras se presentan en niveles de potencia decimétrica a métrica, mientras que las areniscas alternan con ellas formando niveles centimétricos. Las dolomías también se presentan en niveles de orden decimétrico a métrico, y su aspecto de campo es terroso, debido al gran tamaño de sus cristales y a los procesos de alteración que han sufrido.

El desarrollo de la cueva tiene un claro control litológico y estructural. Las cavidades se generan por disolución de las dolomías, así como por los consiguientes colapsos de las pizarras y areniscas suprayacentes, dispuestas en capas de pequeño espesor. Por otra parte, la red de galerías de la cueva sigue la orientación N150 característica de la estructura, y la morfología de las distintas salas reproduce en cierta medida la forma en cofre de los pliegues de escala decamétrica a métrica que afectan a la serie precámbrica (Alonso-Zarza et al., 2005). Un aspecto importante es que el escaso espesor de los niveles dolomíticos impide el desarrollo de las morfologías kársticas superficiales características de formaciones carbonáticas de mayor entidad, condicionando además las dimensiones, relativamente pequeñas de esta cueva.

La Cueva de Castañar

La Cueva de Castañar (Fig. 2) es una cavidad kárstica de reducidas dimensiones; se han topografiado unos 2.135 m distribuidos en salas y galerías que dibujan un entramado de oquedades de escasa altura que constituye la cavidad. En la actualidad se ha construido una caseta que protege el recinto de entrada al sistema kárstico; la entrada natural a la cavidad está cerrada por una compuerta metálica sobre el hueco original que dio origen a su descubrimiento de forma fortuita. Esta compuerta sólo se abre para las visitas con objeto de mantener estable el sistema físico-químico reinante en su interior. Para acceder a la cueva se desciende por una escalera metálica que salva el desnivel verticalizado que existe entre la boca y la primera galería de entrada, siendo la diferencia de cota entre ambos puntos de unos 9 m; para la instalación manual de esta escalera fue necesario ampliar la sección del hueco original en toda su longitud, lo que ha permitido instalar pequeños rellanos que facilitan el acceso al visitante y reducen la sensación de desnivel.

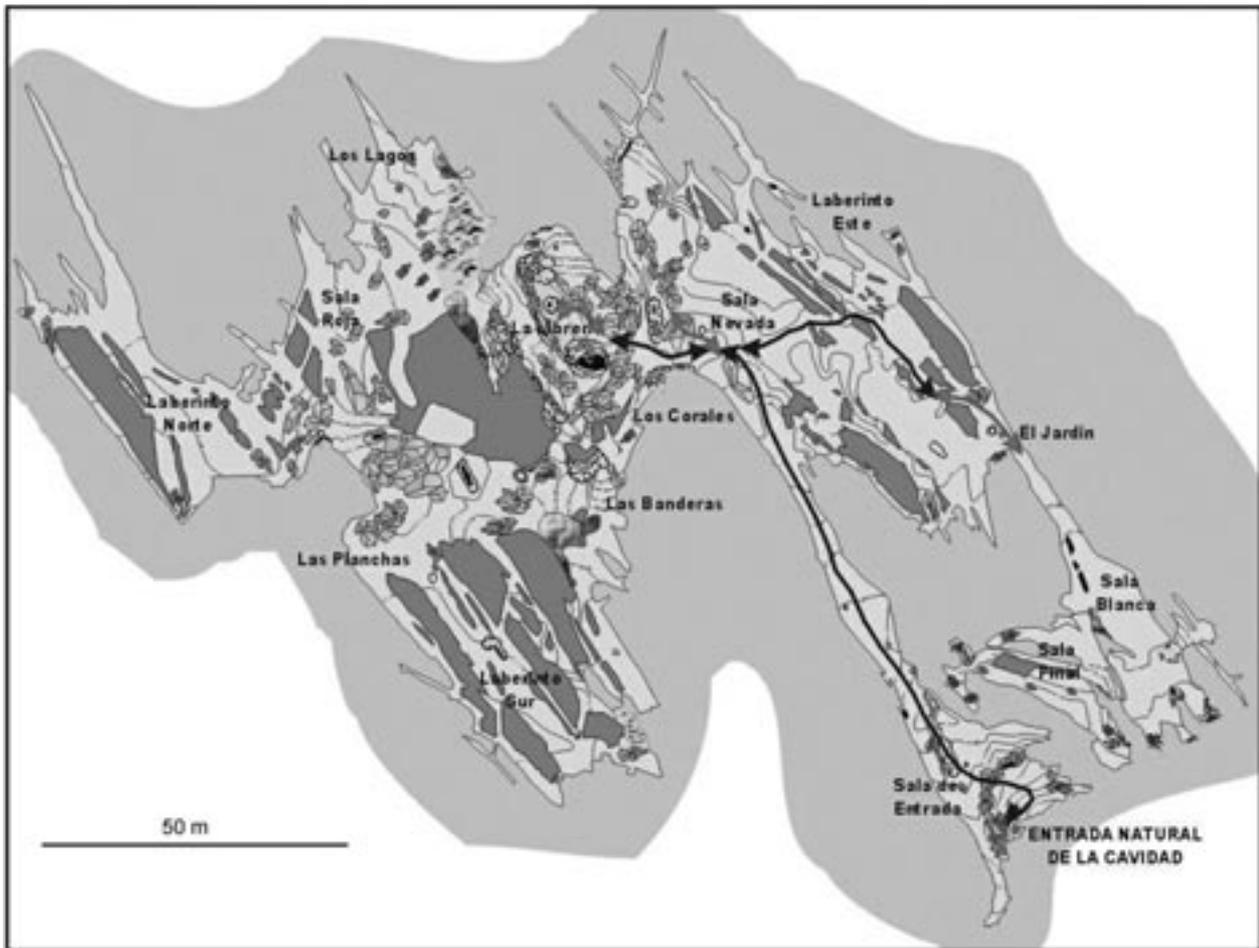


Figura 2. Mapa topográfico de la cueva de Castañar. Las flechas señalan el recorrido que realizan las visitas.

Salvado el desnivel se localiza la galería principal con una longitud de unos 180 metros y en origen una escasa altura, lo que condicionó la realización de un ligero rebaje en el suelo con objeto de facilitar el acceso. En este pasillo se encuentran los primeros espeleotemas que sorprenden al visitante aunque constituyen sólo un pequeño anticipo del universo de formaciones que verán más adelante.

Este pasillo o galería conduce a la denominada Sala Nevada. Esta es una de las salas de mayores dimensiones de la cueva y actúa como distribuidor de los distintos recorridos por ésta; su nombre responde al aspecto nevado de su superficie, cubierta por un tapiz blanco sólo roto por los reiterados recorridos de los visitantes en forma de pasillos debidamente delimitados para evitar la destrucción de las formaciones minerales. Desde la Sala Nevada se puede acceder al Laberinto Este, Sala del Jardín, Sala Blanca y Sala Final, todas ellas localizadas en el sector oriental de la cueva. Entre ellas, es la Sala del Jardín la que ofrece uno de los espectáculos

más sorprendentes al visitante por la belleza, variedad y abundancia de espeleotemas que tapizan techos, paredes y suelo.

Desde la Sala Nevada se accede asimismo a la zona occidental de la cueva compuesta por las Salas de La Librería, Los Lagos, Roja, Laberinto Norte, Las Planchas, Laberinto Sur y Los Corales, en un recorrido circular hasta volver a la Sala Nevada.

El recorrido realizado por las visitas empieza en la entrada natural a la cueva pasando por la galería principal hasta la Sala Nevada desde donde acceden a la Sala del Jardín para volver sobre sus pasos. Este trayecto fue modificado recientemente en respuesta a los resultados de los estudios científicos en marcha, anteriormente los visitantes pasaban a la Sala de La Librería acercándose excesivamente a las formaciones, lo que provocó la aparición de los primeros signos de deterioro. Solo conociendo las características de los espeleotemas y sus procesos de formación y deterioro se pueden determinar las condiciones más óptimas para su conservación.

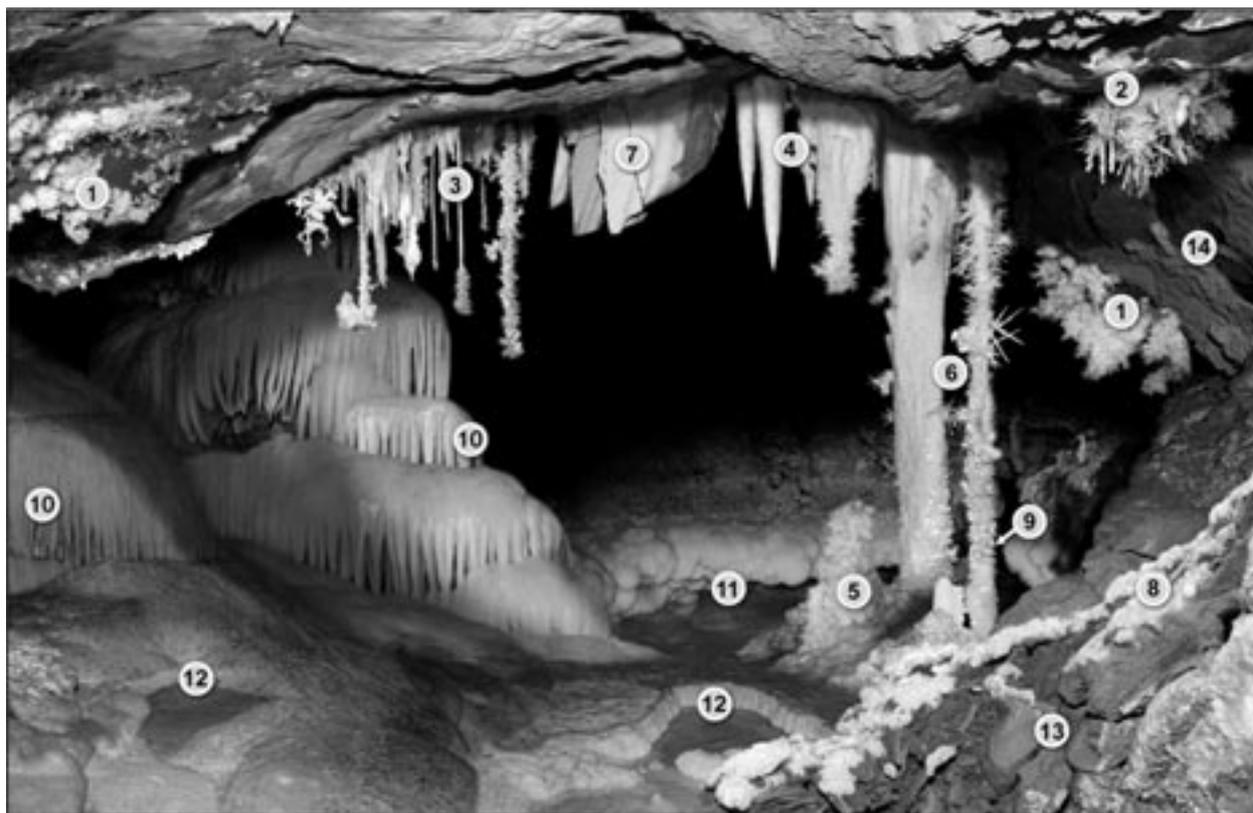


Figura 3. Fotomontaje idealizado de las formaciones de espeleotemas más características de la Cueva de Castañar. 1) Fibrosorradiados individuales y compuestos, 2) Ramificados, 3) Varillas, 4) Estalactitas, 5) Estalagmitas, 6) Columnas, 7) Banderas, 8) Tapizados de fibrosos, 9) “Mon-on-milk”, 10) Colada, 11) Lagos, 12) “Gours”, 13) Colapso de bloques y 14) Arcillas rojas.

Características de los espeleotemas

Para la caracterización de los espeleotemas se ha desarrollado un minucioso trabajo de campo, en el que se han descrito detalladamente las características peculiares de cada sala, los tipos de espeleotemas hallados y las relaciones existentes entre ellos y la litología encajante. El trabajo de laboratorio ha incluido la determinación mineralógica mediante difracción de rayos X, la elaboración de láminas delgadas para el estudio textural, el análisis microtextural de las muestras mediante microscopía electrónica de barrido, y el análisis químico de las muestras, tanto de roca total, como análisis químicos puntuales mediante microsonda electrónica.

Una gran parte de los espeleotemas de la Cueva de Castañar son formaciones tremendamente frágiles, por sus dimensiones y también por los lugares en los que se ha producido su crecimiento. Se han reconocido los siguientes tipos de espeleotemas (Fig. 3).

1) *Coladas*: Son formaciones, generalmente de calcita, que se generan en las zonas en las que el flujo de agua es o ha sido importante. Forman grandes mantos que llegan hasta el suelo de forma escalonada, cubriendo muchas veces las formaciones que encuentran a su paso.

2) *Banderas o cortinas*: este tipo de espeleotemas se forma en las zonas de salida de agua a través de diaclasas o pequeñas fracturas. Son espeleotemas que cuelgan de las paredes como velos y son esencialmente de calcita.

3) *Varillas*: en el techo de la cueva se reconocen varillas colgantes. Suelen ser formas verticales con morfología tubular y un canal central por donde gotea el agua. Su diámetro no supera los dos o tres centímetros y su longitud algunos decímetros. En muchas ocasiones, sobre su superficie crecen otras formas como varillas excéntricas o formas arborescentes, sobre todo en las zonas inferiores. Son de aragonito o calcita, pero, en muchos casos, en los formados por calcita se observan relictos de aragonito, lo que indica que su mineralogía inicial pudo ser también aragonítica.

4) *Estalactitas*: formas cónicas o cilíndricas que cuelgan del techo y presentan un canal central por donde circula el agua. Son algo mayores que las varillas, presentando anchuras centimétricas y una longitud que puede alcanzar varios decímetros. Al igual que en las varillas, sobre su superficie pueden crecer otras formas como excéntricas o agregados arborescentes de fibrosos. Son mayoritariamente de calcita.

5) *Excéntricas*: se definen como espeleotemas alargados que presentan un canal central y que crecen en cualquier dirección. Son formas que crecen desde el techo y paredes y pueden medir algunos decímetros de longitud y unos 2 o 3 cm de diámetro. Pueden generarse sobre estalactitas o varillas, formando verdaderos puentes entre unas y otras.

6) *Estalagmitas*: son relativamente escasas en esta cueva. Crecen desde el suelo, siempre que exista un goteo a partir de una estalactita. Su composición es calcítica. Son formas bastante macizas de algunos centímetros de anchura y algunos decímetros de altura.

7) *Columnas*: se forman por la coalescencia de estalactitas y estalagmitas. En muchas ocasiones no son la estalactita y estalagmita las que se unen, sino los crecimientos de formas fibrosas arborescentes que a menudo se desarrollan sobre ellas.

8) *Gours*: se conoce con este nombre a las pequeñas presillas alargadas y sinuosas que se forman sobre las coladas u otras zonas que presentan pendiente en la cueva. Delimitan pequeñas terrazas en las que queda retenida el agua. El fondo de los gours se tapiza por cristales escalenoédricos de calcita.

9) *Formas fibrosas*: las formas fibrosas son los espeleotemas más característicos de la cueva de Castañar y unos de los más abundantes. Se trata de cristales aciculares de aragonito, aunque localmente pueden haberse transformado en calcita. Las dimensiones de estos cristales son variables: los más pequeños forman acículas que no superan los dos milímetros de longitud, y los más grandes pueden alcanzar unos 10 centímetros y un grosor de hasta 5 mm. Casi siempre se desarrollan a partir de un punto central, formando agregados fibroso-radiales, y en algunos casos rellenando grietas en empalizada. El tamaño, y la densidad de los cristales definirán los distintos tipos de formaciones: a) ramificados: son cristales de aragonito acicular que pueden alcanzar más de 10 cm de longitud y escasos milímetros de grosor. Crecen radialmente a partir de un punto central inicial, pero posteriormente pueden crecer erráticamente. Se sitúan sobre las paredes y techo de la cueva o sobre otros espeleotemas como estalactitas, varillas o cortinas; b) flores y guirnaldas (fibrosorradiales individuales y compuestos): son formas de crecimiento arborescente, también conocidos como "frostwork". Los cristales de aragonito acicular crecen formando sucesivos abanicos que dan lugar a formas ramosas y delicadas. El crecimiento sucesivo de varias de estas formas ramosas puede dar formas de hasta 1 m de longitud, conocidas como guirnaldas; c) tapizados fibrosos: tanto en las arcillas que cubren las paredes en muchas salas de la cueva como en los bloques de pizarras y dolomías caídos, crecen cristales

de aragonito, generalmente de muy pequeño tamaño, formando recubrimientos. Estos cristales crecen de manera radial, y pueden formar semiesferas de algunos centímetros de diámetro de formas muy delicadas o bien coalescer tapizando por completo la superficie en la que se desarrollan.

10) *Moon-milk*: es un tipo de espeleotema que por lo general se desarrolla sobre otros espeleotemas previos, en su zona más externa. Es un depósito globular de color blanco mate que puede tener un gran contenido en agua intercrystalina. Los minerales que lo forman en esta cueva son huntita, dolomita, magnesita y más raramente hidromagnesita.

La localización de los distintos espeleotemas no es aleatoria, las formaciones de mayor entidad (coladas) se sitúan en zonas de mayor aporte de agua, que tiene su salida a través de sistemas de fracturas, como se observa en la Sala de la Librería. Por otra parte, las cortinas y banderas suelen seguir diaclasas de menor entidad, al igual que algunas estalactitas. La secuencia de espeleotemas varía de unos lugares a otros de la cueva y además ha sufrido modificaciones por transformaciones de unos minerales en otros. Lo más frecuente es que sobre cualquier tipo de espeleotema o sobre la roca caja se formen formas fibrosas de aragonito y sobre ellas flores y tapizados de fibrosos. Todos ellos pueden neomorfizarse en calcita y también ser cementados por ésta, dando lugar a formas más resistentes. Por último, sobre cualquier espeleotema se puede formar moon-milk.

La Cueva de Castañar como ejemplo de laboratorio natural

Un aspecto que no queremos dejar de señalar es el interés de la cueva como laboratorio natural para el estudio de la génesis y diagénesis de carbonatos. Sistemas como el de Castañar en el que se observan tan nítidamente procesos como la precipitación, disolución y transformación de carbonatos, son muy raros. Si a esto añadimos la presencia de carbonatos magnésicos y más específicamente de dolomita, hasta ahora escasamente descrita en formaciones recientes y menos en ambiente meteórico, hay que concluir que la Cueva de Castañar es un sistema único, que puede servir como laboratorio natural para entender muchos procesos geológicos. Por todo ello, es conveniente hacer un esfuerzo importante para conocerla mejor y así poder preservarla en las condiciones más óptimas. A continuación se describirán los procesos más relevantes que se están produciendo actualmente dentro de la cueva y que permiten considerarla como un laboratorio natural.

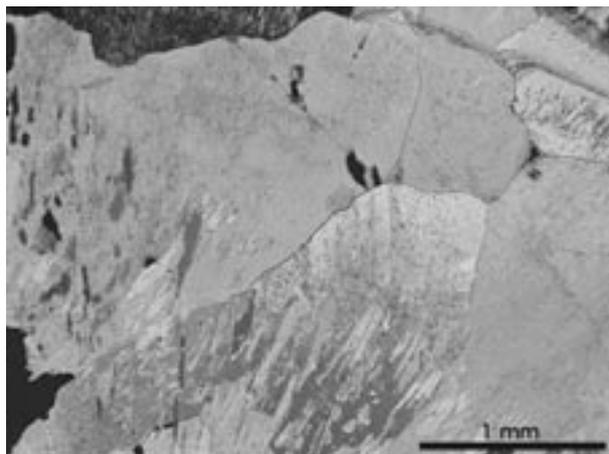


Figura 4. Fotografía de microscopio petrográfico (luz polarizada) en la que se observan cristales fibrosos de aragonito que quedan como relicto dentro de cristales mayores de calcita.

Formación de arcillas rojas

Dentro de la cueva se observa en muchas zonas la presencia de arcillas rojas. Estas arcillas tapizan las paredes de la cavidad y dan un tono rojizo fuerte que contrasta con el de los espeleotemas. Las arcillas han podido ser en parte arrastradas desde la superficie por el agua de infiltración. Pero también la disolución de las dolomías (que a veces contienen restos de arcillas), la del cemento dolomítico de areniscas y pizarras y la hidrólisis de algunos componentes de las pizarras y areniscas, favorece que se genere un residuo insoluble, constituido esencialmente por estas arcillas rojas. Todo

esto hace que muchas de las paredes de la cueva estén recubiertas por material blando poco consistente, en el que crecen muchas de las formaciones, es decir, que ya inicialmente el soporte es blando, lo que favorece que el aumento de peso que conlleva el crecimiento de muchas de las formaciones haga que estas puedan desprenderse con facilidad.

Transformación aragonito-calcita

Una parte importante de los espeleotemas que se forman en la cueva son cristales fibrosos de aragonito de dimensiones muy variadas (Fig. 4). En las formaciones de carácter vertical, como es el caso de algunas situadas en el Jardín, se observa en la parte alta de las columnas que la presencia de fibrosos y excéntricos de aragonito es menor, mientras que aumenta hacia la parte inferior de las columnas y también hacia la parte alta de las estalagmitas. Este hecho también se observa a menor escala, pues los cristales fibrosos y brillantes de aragonito pasan a ser algo menos transparentes (calcita) y finalmente llegan a quedar englobados en un mosaico poiquilotópico de calcita, en el que finalmente quedan engullidos (Fig. 4). Todo ello indica que con el tiempo los cristales de aragonito pasan a cristales de calcita, perdiendo su hábito acicular. Las numerosas formaciones de aragonito de la cueva, son ciertamente especiales y más aún por el hecho de que pueda observarse su transformación posterior en calcita. El estudio en detalle de este proceso se está llevando a cabo y hay que señalar que no son muy frecuentes los sistemas naturales donde este proceso de inversión aragonito-calcita pueda estudiarse.

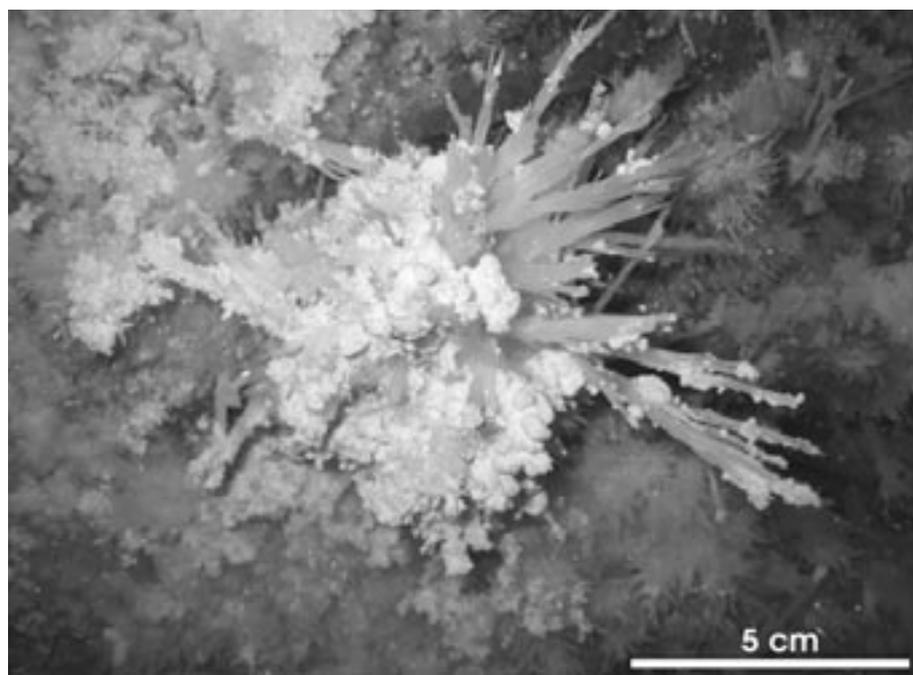


Figura 5. Cristales fibrosos de aragonito cubiertos parcialmente por "moon-milk" de huntita y dolomita.

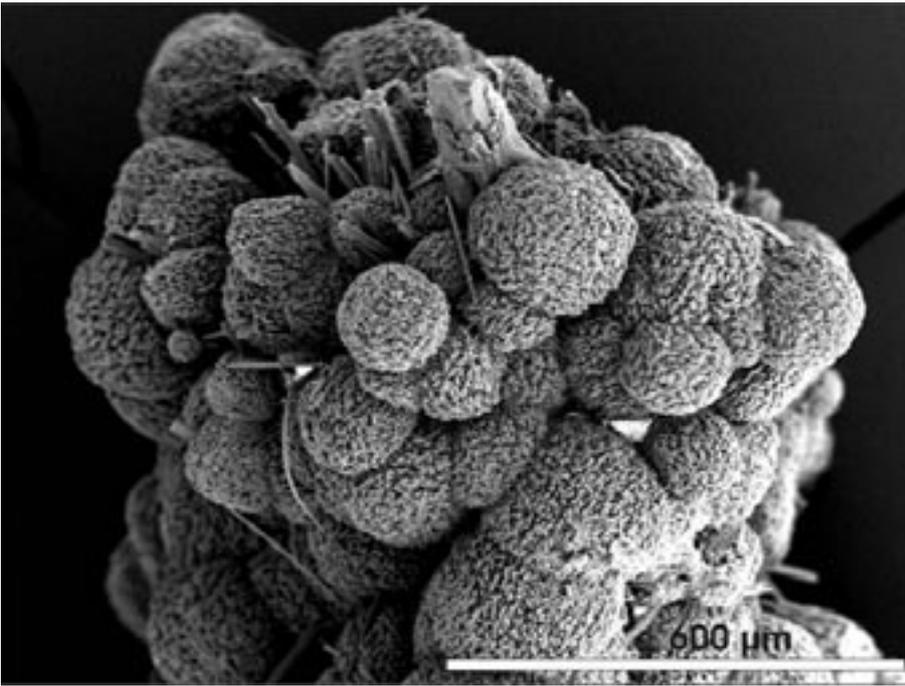


Figura 6. Fotografía de SEM del crecimiento de dolomita (esferoides) apoyándose y reemplazando a cristales fibrosos de aragonito.

Formación de minerales magnésicos

Como ya se ha comentado, además de los carbonatos cálcicos, calcita y aragonito, también hay en la cueva carbonatos magnésicos sobre todo huntita, dolomita y más raramente magnesita e hidromagnesita, formando parte del “moon-milk” (Figs. 5 y 6). Todos estos se forman como un producto residual, cuando las soluciones acuosas están más saturadas en magnesio y posiblemente bajo influencia orgánica. La formación de estos carbonatos cálcico-magnésicos está condicionada por la disolución de las dolomías precámbricas lo que hace que los fluidos sean ricos en magnesio y dependiendo del grado de saturación puedan precipitar calcita, aragonito huntita e hidromagnesita (Hill y Forti, 1986). Sin embargo, hay que tener en cuenta la influencia de los microorganismos, que pueden contribuir a la formación de huntita y de dolomita, y también las posibles transformaciones de minerales metaestables en los más estables. En el caso de la Cueva de Castañar, parece clara la formación de dolomita a expensas de la huntita, a veces en presencia de películas orgánicas (Martín-Pérez y Alonso-Zarza, 2005).

Condiciones microambientales e hidrogeoquímicas

La mejor manera de mantener el equilibrio natural de la cueva para no modificar sus condiciones ni los procesos que en ella tienen lugar es conocer muy bien su microambiente, las características de sus aguas y el efecto que sobre ellas pueden ejercer las visitas. Para ello se realizaron los estudios que a continuación se describen.

El sistema de monitorización microambiental instalado en diciembre de 2003 y aún en funcionamiento, está constituido por los siguientes elementos:

- 1) *Exterior-centro de interpretación.* Consta de una estación meteorológica exterior con registro autónomo y protección intemperie para los siguientes sensores: temperatura, humedad relativa, lluvia. Cada sensor es independiente del resto del sistema y está alimentado por baterías individuales. El intervalo de registro es de una hora (24 datos/día). Los sensores de temperatura y humedad se instalaron en la fachada exterior del centro de interpretación de la cueva con orientación norte, con el fin de impedir el sobrecalentamiento y distorsión de los datos como resultado de la insolación directa.
- 2) *Caseta de entrada a la cueva.* En este punto se procedió a la instalación del Sistema de gestión y control de alimentación dotado de dos baterías de 12V. Estas baterías fueron instaladas como sistema de alimentación en reserva, con objeto de evitar daños en el equipo debidos a ceses breves (no superiores a 24 horas) en el suministro de energía.
- 3) *Sala Nevada.* En este lugar se sitúan: i) una unidad de adquisición de datos y central de acondicionamiento de señal; ii) un sensor de temperatura de aire (para 100% H.R); iii) un sensor de CO₂ de aire; iv) un sensor de Agua total en aire; v) un sensor de Radón (²²²Rn); vi) dos sensores de Temperatura de aire/roca; y, vii) un sensor de presión atmosférica.

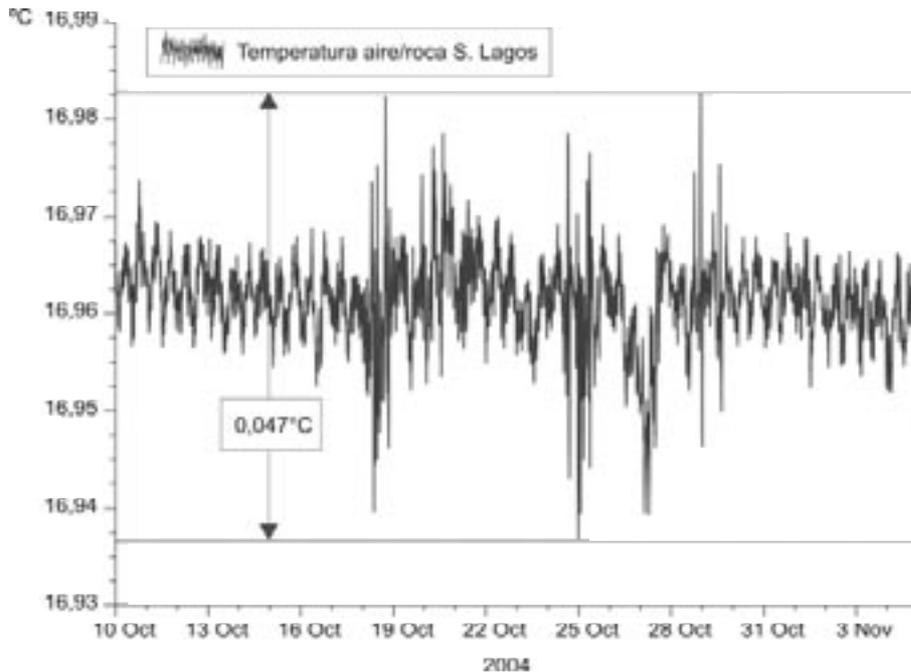


Figura 7. Perturbación de la temperatura del aire en la Sala de los Lagos provocada por el incremento de los goteos tras un periodo de lluvias intensas en Octubre de 2004.

4) *Sala de los Lagos*. En esta sala se han colocado: i) un sensor de tasa de infiltración agua; ii) un sensor pH del agua de infiltración; iii) un sensor de conductividad eléctrica del agua de infiltración; iv) un sensor de temperatura de agua de infiltración; v) un sensor de temperatura de aire (para 100% H.R), y vi) un sensor de CO₂ de aire.

Los datos obtenidos mediante el sistema de monitorización de datos microambientales junto al seguimiento de la hidroquímica de infiltración permiten definir los parámetros que controlan las propiedades geo-físico-químicas del sistema subterráneo de la Cueva Castañar y el impacto derivado de la entrada de visitantes en el medio subterráneo.

La Cueva de Castañar se sitúa en la zona vadosa superior de un sistema kárstico de características especiales derivadas del tipo de roca (pizarras) que predomina en la formación encajante. La roca actúa como membrana interna aislante y como encajante del medio subterráneo. Su composición química y mineral y sus propiedades texturales (porosidad) y estructurales (fisuración) determinan las propiedades físico-químicas y el flujo del agua que alcanza el medio subterráneo. En este caso, la característica más determinante es su baja porosidad conectada estimada en valores del 2 al 4,5% en los ensayos realizados en muestras frescas tomadas en el interior de la cavidad. Su capacidad aislante aumenta con su espesor, que podemos considerar en torno a los 20-30 m en la mayor parte de la zona visitada. Esta gran capacidad aislante se ha podido comprobar mediante la monitorización microambiental.

Los datos registrados y analizados nos permiten definir el medio como un ambiente subterráneo de baja energía (Heaton, 1986) en el cual la tasa de intercambio energético con el exterior es mínima, siendo los goteos de agua los eventos de mayor energía del sistema. Este hecho se ha comprobado al estudiar el registro de temperaturas de la Sala de los Lagos durante el mes de octubre de 2004 (Fig. 7), observando como un incremento de la tasa de infiltración originado tras lluvias de intensidad moderada-alta, provoca una perturbación transitoria de la temperatura del aire con magnitudes (0,047°C), muy próximas al rango de oscilación térmica anual bajo condiciones naturales (0,06°C).

En conjunto todo el sistema presenta un microclima estable y un bajo intercambio energético con el exterior, controlado fundamentalmente por la diferencia de temperaturas exterior/interior y por la cantidad de agua y CO₂ presentes en el suelo, que marcan dos periodos bien diferenciados a lo largo del ciclo anual: mayo-octubre y noviembre-abril. A partir de la mitad del mes de mayo y hasta la primera decena de octubre, la temperatura del aire exterior se mantiene constantemente por encima de la zona interna de la cueva (Fig. 8). Esta diferencia T_{ext}/T_{int} es uno de los factores determinantes en los fenómenos de intercambio de gases entre el sistema kárstico y el exterior. La conexión exterior/interior y en definitiva el grado de apertura físico-química del sistema subterráneo es mayor durante el verano cuando la T_{ext} es superior a la T_{int} y se produce una disminución de la humedad del suelo y roca que provoca la apertura del

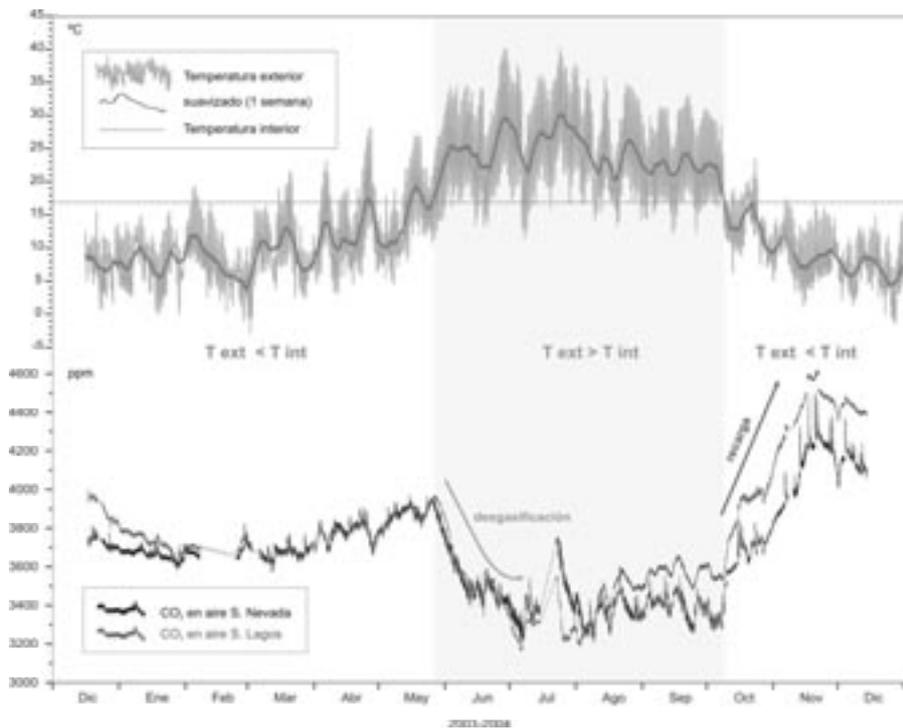


Figura 8. Registro de temperaturas exterior e interior y concentración de CO_2 del aire durante el ciclo anual de 2004. Se indican las fases de recarga y desgasificación del sistema.

sistema poroso y fisural de ambas membranas aislantes. Durante el invierno se invierte la situación, el aire exterior se enfría y el agua de infiltración cargada en CO_2 procedente del suelo externo favorece la recarga del sistema hasta alcanzar una nueva situación de equilibrio.

El intercambio en fase gaseosa con el exterior durante la época estival no afecta, sin embargo, a la estabilidad termohigrométrica de la cueva dada la baja conductividad de la roca encajante, que mantiene el equilibrio térmico con la atmósfera interior y la humedad relativa del aire en saturación ($>99,5\%$) a lo largo de todo el año. Cuando se produce la desgasificación, el aire de la cueva se renueva mediante la entrada de nuevo aire procedente del sistema poroso y fisural de la roca encajante provocando el descenso del aire situado en el suelo externo, permitiendo mantener concentraciones de CO_2 menores, pero también relativamente elevadas a lo largo de esa etapa.

En un sistema físico-químico como el descrito, el papel del agua es triple: como hemos indicado previamente, incorpora el CO_2 del suelo y lo transporta, provocando la disolución parcial de la roca y rellenando parte del sistema poroso de suelo y roca, favoreciendo así la acumulación del gas en el interior. Todo ello muestra su eficacia como vehículo de transferencia de materia y energía desde el exterior. Su composición química está controlada por la mineralogía de la roca encajante y del tiempo de transición hasta alcanzar la cavidad, siendo

esencialmente de tipo $\text{Mg}^{2+}\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ debido a su circulación por zonas dolomitizadas; su contenido en Mg^{2+} es mayor en los puntos de goteo lento debido a una mayor interacción con la roca durante un tránsito más lento. Su composición química es bastante estable a lo largo del año, con descenso en la relación $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ durante el verano debido a procesos de evaporación y precipitación mineral en su tránsito y permanencia en el suelo exterior. En general las aguas están muy próximas al equilibrio o ligeramente sobresaturadas en calcita y aragonito, habiéndose detectado un límite para la precipitación mineral marcado esencialmente por el valor de la PCO_2 ya que la temperatura se mantiene constante a lo largo de todo el año. Como indican Sánchez-Moral et al. (2006), a partir del descenso de la PCO_2 por debajo de valores de $10^{-2,30}$ a $10^{-2,35}$ bar y hasta alcanzar $10^{-2,47}$ a $10^{-2,50}$ bar, las aguas experimentan una progresiva y leve sobresaturación que indica una lenta precipitación mineral de fases carbonatado-cálcicas (aragonito y/o calcita) y conlleva una disminución de la subsaturación en fases magnésicas (huntita). Una vez la PCO_2 disminuye por debajo de $10^{-2,50}$ bar, la tasa de precipitación mineral debe aumentar, provocando una nueva estabilización de la sobresaturación mineral. El valor de la PCO_2 del aire a lo largo del ciclo anual de 2004 con un bajo rango de oscilación entre $10^{-2,37}$ en invierno y $10^{-2,55}$ en verano con un valor medio de $10^{-2,46}$ bar, valores que indican que los procesos de precipitación mineral están activos y deben producir-

se fundamentalmente durante las etapas estivales con una cinética lenta, permitiendo el desarrollo de cristales bien formados. Los valores de la PCO_2 señalados, pueden considerarse como umbrales (aproximados) para el cambio de tasa de precipitación mineral y muy probablemente determinen el tipo de cristalización de los espeleotemas formados en la cueva. Un cambio en la tasa de intercambio energético y de gases con el exterior podría provocar variaciones en los valores de PCO_2 del aire que causarían la alteración de ese frágil equilibrio y el deterioro de los espeleotemas presentes en la cueva.

Efecto de las visitas en el equilibrio físico-químico del medio subterráneo

Un sistema físico-químico de tan alta estabilidad como el estudiado es muy frágil ante cualquier perturbación microambiental. El efecto de las visitas, aunque moderado en valores absolutos, se traduce en un incremento sustancial de la oscilación termohigrométrica y de la concentración de CO_2 en el aire interior. Las visitas también provocan cambios de tendencia en la evolución de la temperatura e incrementos de las oscilaciones de corto período en la Sala Nevada como consecuencia de la apertura de la puerta de acceso antes de la visita.

Los incrementos de temperatura de la interfase aire-roca, CO_2 y vapor de agua en un ambiente con humedad en saturación a lo largo de todo el ciclo anual, favorecen el desarrollo de procesos de microcorrosión de los espeleotemas (Sánchez-Moral et al., 1999), además de activar los procesos metabólicos de los microorganismos que colonizan la roca.

La emisión de vapor de agua a $37^\circ C$ provocada por los visitantes induce la condensación de agua preferentemente sobre los paramentos horizontales elevados como son los techos donde se sitúan los espeleotemas. La cantidad estimada de agua líquida con poder disolvente generada por este mecanismo (49 litros en el ciclo anual de 2004) es considerable y puede ser la responsable de los fenómenos de corrosión que ya se detectan en muchos puntos de la cueva. En conclusión, la entrada de visitantes en la cavidad es perjudicial para la conservación de los espeleotemas, en particular, en aquellas zonas donde los visitantes se aproximan mucho a las formaciones cristalinas ya que la condensación se producirá de forma preferente en las áreas altas más cercanas a la fuente de emisión del vapor de agua.

En función de los impactos detectados por la entrada de visitantes, en diciembre de 2005 se procedió a un cambio en las condiciones de visita. El efecto de dicho cambio está siendo monitorizado y los nuevos resultados nos indicarán la efectividad de las nuevas medidas enfocadas a la conservación de la cavidad.

La gestión del Monumento Natural Cueva de Castañar

Desde su declaración como espacio natural protegido la gestión de la Administración Autonómica (Consejería de Agricultura y Medio Ambiente) se ha centrado principalmente en el fomento de los estudios necesarios para conocer el estado ambiental y técnico del Monumento Natural, en la elaboración de proyectos y en la contratación y coordinación de las obras necesarias para habilitar el uso público del espacio subterráneo, en las adecuadas condiciones de seguridad y con la exigencia de mantener las condiciones ambientales originales.

En 1998 se elaboró un Estudio de Seguimiento de Visitantes y posteriormente se llevó a cabo la ejecución del Proyecto de Obras de Protección de Acceso y Adecuación para el uso público. Las obras consistieron en el acondicionamiento del camino peatonal de acceso desde el Centro de Interpretación hasta la cavidad, en la construcción de una caseta de protección de la entrada natural a la cueva, en la instalación de una escalera en el pozo de bajada y en el acondicionamiento de la galería principal, a lo largo de prácticamente sus 180 m de longitud, consistente en el rebaje del substrato rocoso, realizado manualmente, dada la elevada fragilidad ambiental de la Cueva de Castañar.

Actualmente se realizan visitas guiadas a la cueva en un régimen establecido según los resultados y recomendaciones de los estudios científicos en marcha. Las entradas son concertadas y se llevan a cabo en grupos reducidos previa solicitud en el Centro de Interpretación del Monumento. El régimen de visitas es muy limitado, realizándose unas tres entradas semanales, por lo que existe lista de espera; el número de personas que componen los grupos, así como las edades de las personas que pueden acceder a la cavidad, se encuentra asimismo restringido. Las condiciones del régimen de visitas van cambiando dependiendo de los resultados de los estudios que se están realizando.

Se realizan visitas controladas, en grupos reducidos de seis personas como máximo y con un tiempo de permanencia en la cavidad no superior a 60 minutos. En lo referente a la periodicidad de las visitas, en el caso de introducir dos grupos el mismo día, el intervalo de tiempo entre la salida del primero y la entrada del siguiente debe ser el máximo posible y siempre superior a 5 horas, con objeto de no producir efectos acumulativos en los incrementos de temperatura y humedad. Los fuertes incrementos de CO_2 provocados por las visitas en la fase de recarga de la cavidad (meses de octubre y noviembre) nos llevan a reducir al máximo el número de visitas durante este periodo; en caso de realizar alguna entrada, el periodo de descanso entre una y otra será superior a tres días.

Por las condiciones concretas de esta cavidad, el tipo de visitas a realizar se encuadra dentro de la actividad denominada espeleoturismo, es decir, entradas guiadas y previa cita. Los visitantes acceden al interior con el calzado limpio y desinfectado, con un mono, casco y luz frontal que se facilitará en el Centro de Interpretación, todo ello con el objeto de no introducir ningún elemento extraño ni materia orgánica al interior. Las edades de los visitantes están comprendidas entre los 12 y los 65 años; teniendo en cuenta que la actividad requiere una exigencia física de tipo medio, deberá estar cada menor acompañado de un adulto responsable.

El recorrido en el interior variará en función de los resultados de los estudios en marcha y estará a criterio del guía responsable, según el comportamiento de los miembros del grupo y de los posibles riesgos de daños para la cavidad. Igualmente, estará a criterio del guía responsable la posible modificación del recorrido, variación en la duración (nunca superior a 60 minutos) o incluso dar por terminada la visita. Un aspecto importante que se debe considerar es la erosión mecánica que se produce con la entrada de visitantes, tanto pisadas como roces involuntarios con los espeleotemas. Este efecto erosivo es también muy nocivo para la cueva y es otro indicador del control que debe realizarse sobre las visitas. El sistema de visitas diseñado permite además continuar con los estudios de las formaciones de espeleotemas y de las condiciones microambientales, hidrogeoquímicas y de conservación del Monumento Natural

“Cueva de Castañar” con objeto de evaluar el actual régimen de visitas en la cavidad.

Conclusiones

La Cueva de Castañar es un sistema físico-químico de muy elevada estabilidad (su temperatura y humedad oscilan muy poco en condiciones naturales), por ello es muy frágil ante cualquier perturbación microambiental inducida artificialmente. Los espeleotemas que contiene son muy excepcionales, al igual que muchos de los minerales que en ella se están formando. Los estudios llevados a cabo han permitido observar procesos geológicos hasta ahora no descritos en estos ambientes, por lo que podemos considerar que la Cueva de Castañar es un laboratorio natural para interpretar y conocer mejor los procesos de crecimiento cristalino en ambientes sedimentarios. Solo el conocimiento de las condiciones en las que está la cueva, del impacto de las visitas y de los procesos que en ella tienen lugar permitirá un mejor uso de la misma y su conservación para generaciones venideras.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado mediante cofinanciación de la Junta de Extremadura en un 65% con fondos FEOGA-ORIENTACIÓN y con fondos FEDER de la Unión Europea, a través de sendos convenios con la UCM y CSIC-MNCN. Agradecemos a Ana y Antonio, monitores de la cueva, los días que han pasado enseñándonos la cueva y sus continuas observaciones y preguntas.

Bibliografía

ALONSO ZARZA, A. M., GIL PEÑA, I., MARTÍNEZ FLORES, E. y MUÑOZ BARCO, P. (2005): La cueva de Castañar. En: *Patrimonio geológico de Extremadura: Geodiversidad y lugares de interés geológico*. (P. Muñoz Barco y E. Martínez Flores, Eds.). Junta de Extremadura, 478 p.

ÁLVAREZ NAVA, H., GARCÍA CASQUERO, J. L., GIL, A., HERNÁNDEZ URROZ, J., LORENZO, S., LÓPEZ DÍAZ, F., MIRA, M., MONTESERÍN, V., NOZAL, F., PARDO, M. V., PICART, J., ROBLES, R., SANTAMARÍA, J. y SOLÉ, J. (1988): Unidades litoestratigráficas de los materiales precámbrico-cámbricos de la mitad suroriental de la Zona Centro-Ibérica. *II Congreso Geológico de España*, 1: 19-22.

DÍEZ BALDA, M. A. y VEGAS, R. (1992): La estructura del Dominio de los pliegues verticales de la zona Centro Ibérica. En: *Paleozoico Inferior de Ibero-América*. (J. C. Gutiérrez Marco, J. Saavedra e I. Rábano, Eds.). Universidad de Extremadura, Badajoz, 523-534.

HEATON, T. (1986): Caves: a tremendous range of energy environments on Earth. *Nat. Speleol. Soc. News*, 301-304.

HILL, C. A. AND FORTI, P. (1986): *Cave minerals of the World*. National Speleological Society, Huntsville, AL., 238 pp.

MARTÍN-PÉREZ, A. y ALONSO-ZARZA, A. M. (2005): Dolomitización en sistemas kársticos actuales: el caso de la Cueva de Castañar de Ibor (Cáceres). *Geotemas*, 8: 67-71.

SÁNCHEZ-MORAL, S., CUEZVA, S., LARIO, J. y TABORDA-DUARTE, M. (2006): Hydrochemistry of karstic waters in a low-energy cave (Castañar de Ibor, Spain). In: *Karst, cambio climático y aguas subterráneas* (Durán, J. J., Andreo, B. y Carrasco, F., Eds.), Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 18: 339-347.

SÁNCHEZ-MORAL, S., SOLER, V., CAÑEVERAS, J. C., SANZ-RUBIO, E., VAN GRIEKEN, R. AND GYSELS, K. (1999): Inorganic deterioration affecting the Altamira Cave, N Spain: quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors. *The Science of the Total Environment*, 243/244: 67-84.