

Espeleotemas y evidencias de cavernamiento hipogénico de la Sima de la Higuera (Pliego, Murcia)

F. Gázquez Sánchez ⁽¹⁾, J. M. Calaforra Chordi ⁽¹⁾, F. Rull ⁽²⁾⁽³⁾ y J. Martínez-Frías ⁽²⁾⁽³⁾

⁽¹⁾ G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Universidad de Almería Crta. Sacramento s/n, La Cañada de San Urbano, 04120, Almería. (f.gazquez@ual.es)
(jmcalaforra@ual.es)

⁽²⁾ Unidad Asociada UVA-CSIC al Centro de Astrobiología, Universidad de Valladolid. Parque tecnológico Boecillo, 47151, Valladolid (rull@fmc.uva.es)

⁽³⁾ Centro de Astrobiología (CSIC-INTA). Crta. Ajalvir, Torrejón de Ardoz, 28850, Madrid, (martinezfj@inta.es)

RESUMEN

La Sima de la Higuera (Pliego, Región de Murcia) ha sido habilitada recientemente para actividades de carácter espeleológico, sin embargo poco se sabe todavía sobre sus peculiaridades relacionadas con su posible formación hipogénica. La particular génesis de esta cavidad puede ser un valor añadido al gran interés que su visita suscita a los espeleólogos. Los mecanismos de cavernamiento hipogénico están relacionados con el ascenso de fluidos frecuentemente hidrotermales, con alto contenido en CO₂ y de procedencia más o menos profunda, y prácticamente desconectados del flujo superficial. Mediante el estudio de los elementos geomorfológicos de una cavidad y de las características de sus espeleotemas se puede evaluar la importancia que tuvieron los flujos hidrotermales durante la fase espeleogenética y de precipitación mineral. En el presente trabajo se han estudiado varias evidencias geomorfológicas así como la mineralogía, la geoquímica y la génesis de algunos espeleotemas peculiares de la Sima de la Higuera. En los niveles superiores (-74 m) aparecen grandes *scallops*, formas de erosión/disolución freática con sección elíptica, en muchas ocasiones marcando la dirección de ascenso de los fluidos termales ricos en CO₂. También se han descrito costras de corrosión constituidas por calcita micritizada así como canales y surcos relacionados con mecanismos de cavernamiento hipogénico. Cristales de calcita de precipitación secundaria tipo “spar”, en ocasiones de tamaño centimétrico aparecen frecuentemente rellenando fracturas de la roca de caja. En los niveles intermedios (-100 m) aparecen otros espeleotemas de posible origen hidrotermal como conos de calcita flotante, folias, “nubes de cuevas”, “torres de coral”, o espectaculares depósitos de calcita flotante que sugieren aportes hidrotermales de origen profundo durante su formación. Son especialmente destacables los conos de calcita flotante “dobles”, hasta el momento únicamente descritos en esta cavidad, cuya génesis estuvo relacionada con oscilaciones del nivel epifreático en el entorno de la Sala Paraíso (-98 m). Finalmente, en los niveles inferiores se observan pátinas oscuras de óxidos de Mn-Fe que en ocasiones aparecen cubriendo totalmente la superficie de las galerías, especialmente sobre formaciones subaéreos tipo “*boxwork*”. La gran abundancia de formas no relacionadas con la infiltración de agua meteórica convierte a la Sima de la Higuera en un ejemplo poco frecuente de cavidad hipogénica.

Palabras clave: cueva hipogénica, espeleotemas, hidrotermal, minerales de cuevas, Sima de la Higuera.

ABSTRACT

Sima de la Higuera Cave (Pliego, Southeast Spain) has been recently adapted for speleological use. Nevertheless, there is still no a wide knowledge on the so-called hypogenic origin of this cavity. The peculiar genetic mechanisms can be an added value for exploitation as a speleo-turistic cave. By studying geomorphologic features and speleothem characteristics it has been possible to deduce the predominant speleogenetic mechanism (hypogenic/epigenic) which controlled the evolution of this cave. The hypogenic mechanism that gave rise to this cavity was associated with rich-CO₂ hydrothermal fluid rising, deep in origin and disconnected from meteoric water seepage. In this paper we have studied some geomorphologic evidences and unusual speleothems from Sima de la Higuera Cave. In the upper level (-74 m) large scallops appear, in relation to mechanism of hypogenic speleogenesis, usually indicating the direction of ascendant flows, as well as corrosion crusts made of micritic calcite. In addition, bubble's trails have been identified in relation to CO₂ bubbles rising. Centimeter-sized calcite "spars" of secondary precipitation often appear filling fractures in the host rock. Other typical hypogenic speleothems match in this cave such as calcite raft cones, folia, cave's clouds, coral towers or calcite raft deposits suggesting the influence of thermal water in the cave speleogenesis. Furthermore, in this cave the first occurrence of calcite raft double cones have been indentified, which origin was linked to water table oscillations at the Paraíso Chamber level (-110 m). In the deepest level (-110 m), Mn-Fe oxides have been identified as black coatings that totally cover the cave walls and usually appear on subaerial "boxwork" formations. The wide variety of speleothems not bound to meteoric water seepage turn the Sima de la Higuera Cave into an unusual example of hypogenic cave in Spain.

Key words: cave minerals, hydrothermal, hypogenic cave, Sima de la Higuera Cave, speleothems.

Introducción

La génesis y evolución de la mayoría de cavidades está relacionada con la infiltración de agua de origen meteórico en el medio kárstico. En este tipo de cuevas, denominadas epigénicas o meteóricas, la energía necesaria para la disolución de la roca caja carbonática (o evaporítica) procede de la superficie. Sin embargo, existe otro tipo de cavidades, denominadas hipogénicas, relacionadas generalmente con el ascenso de fluidos hidrotermales, en muchas ocasiones de carácter ácido debido a la presencia de CO₂ y/o H₂S disueltos, de procedencia más o menos profunda y usualmente desconectados del flujo superficial (Palmer, 2011). Se estima que este tipo de sistemas kársticos representan entre el 5-10 % de las cuevas a escala mundial (Forti, 1996; Forti *et al.*, 2002). El término "hipogénico" no hace referencia necesariamente a cuevas especialmente profundas sino al origen de los fluidos que dieron lugar al cavernamiento (Klimchouk, 2009). A pesar de que la mayoría de cuevas hipogénicas deben su origen a la interacción de la roca de caja con agua termal (Forti, 1996; Sarbu y Lascu, 1997), existen algunos ejemplos de cavidades hipogénicas donde el cavernamiento y los mecanismos de precipitación mineral se produjeron a baja temperatura (Galdenzi, 2012).

En relación al estudio sobre la génesis de cavidades, las principales herramientas para identificar los procesos hipogénicos están relacionadas con el análisis de elementos morfogenéticos típicos de este tipo de cuevas. La morfologías generadas por los mecanismos hipogénicos dependen de las características de la roca de caja, de la temperatura a la que se produce el proceso de disolución, así como de la naturaleza de los gases transportados en el agua (Forti *et al.*, 2002). Por ejemplo, cuando los fluidos son ricos en H₂S el mecanismo de ataque ácido suele ser más eficiente que cuando la corrosión es provocada exclusivamente por el CO₂ (Forti *et al.*, 2002), dando lugar a formas de disolución más evidentes que frecuentemente derivan en la precipitación de yeso (Hill y Forti, 1997). Otra morfologías de génesis hipogénicas son los surcos de burbujas (Forti, 1996), los domos de corrosión o los tubos cenitales (Calaforra y De Waele, 2011).

Por otro lado, la identificación de espeleotemas y minerales precipitados en condiciones freáticas a partir de una solución altamente saturada en carbonato cálcico puede ser una herramienta útil para corroborar el origen hipogénico de una cavidad. Por ejemplo, en las cavidades hipogénicas son frecuentes los cristales de calcita biesfenoidales de gran tamaño (Hill y Forti, 1997; Lundberg *et al.*, 2000), los conos de calcita flotante (Hill y Forti, 1997; Audra *et al.*, 2002), las “nubes de cuevas” y folias (Audra *et al.*, 2009), las “torres de coral” o las acumulaciones de calcita flotante (Hill y Forti, 1987).

En el presente trabajo se describen las morfologías hipogénicas observadas en la Sima de la Higuera (Pliego, Murcia). Estas evidencias espeleogenéticas, junto con las características mineralógicas y geoquímicas de algunos de sus espeleotemas han permitido establecer un modelo evolutivo preliminar para esta cavidad.

Entorno geológico y características de la Sima de la Higuera

La Sima de la Higuera está ubicada en la Sierra de Espuña, en el término municipal de Pliego (Región de Murcia). Su entrada se encuentra a 485 m s.n.m y está coronada por una gran higuera, a la que debe su nombre. Las labores de exploración espeleológica de esta sima-cueva empezaron en 1997 aunque existen evidencias de que su descubrimiento fue anterior a esta fecha (Club Cuatro Pico y Club Pliego Espuña, 2001; Ferrer, 2010). Su desarrollo conocido es de 5500 metros y la profundidad máxima alcanzada es de 156 metros con respecto a la entrada del pozo y de 82 con respecto a su base (Fig. 1). La cavidad se desarrolla en conglomerados y calizas del Oligo-Mioceno relativamente fracturadas debido a empujes dirigidos en dirección NW-SE que dieron lugar a un conjunto de diaclasas y fallas que controlaron su morfología, sobre todo en sus niveles más profundos. El entorno de la cueva aparecen importantes manantiales hidrotermales con temperaturas comprendidas entre 30 y 50 °C, entre los que destacan los de las localidades de Mula y Archena, a 10 y 20 km de la cueva, respectivamente (Baños, 1995). El alto flujo calorífico se debe al relativo adelgazamiento de la corteza terrestre y a la presencia de masas magmáticas recientes originadas por erupciones volcánicas que tuvieron lugar hace aproximadamente un millón de años (Pinuaga-Espejel *et al.*, 2000).

La cueva presenta marcadas evidencias de su origen hipogénico. Este hecho viene indicado por la presencia de formas de disolución específicas de cavidades hipogénicas así como espeleotemas relacionados típicamente con este tipo de sistemas hidrotermales. También su elevada temperatura ambiental con respecto a la media

exterior (13.8 °C), que actualmente oscila entre 18.6 °C y 21.7 °C y aumenta ligeramente hacia las zonas más profundas, indica una importante anomalía térmica positiva que podría apuntar a un origen relativamente reciente. En cuanto a la humedad relativa del aire, ésta oscila entre 87.5 y 90 % (Club Cuatro Pico y Club Pliego España, 2001).

Aunque las evidencias en cuanto a espeleotemas y formas espeleogenéticas apuntan a que los aportes de agua a la cueva en el pasado fueron de origen hidrotermal y profundo, actualmente la entrada de agua es únicamente de origen meteórico, y se produce mediante infiltración. La presencia de espeleotemas vadosos generados por goteo (estalactitas, estalagmitas...) es muy escasa y se limita a los sectores más someros, en torno a -74 m y por encima del nivel de la Sala de la Bañera.

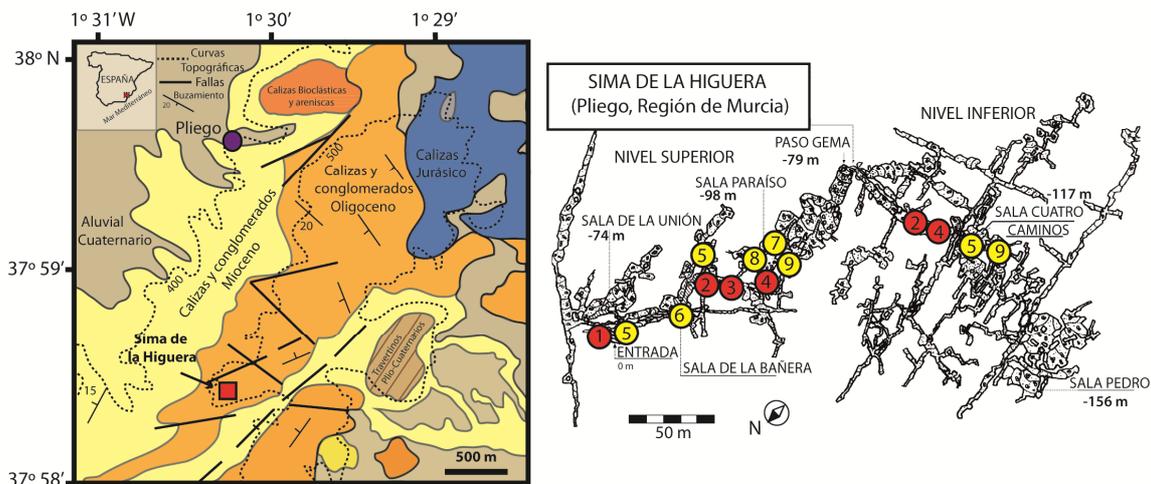


FIGURA 1. Entorno geológico (basado en MAGNA 1:50.000; Kampschuur et al., 1978) y mapa topográfico de la Sima de la Higuera (Pliego, Murcia) tomado de los Clubs Cuatro Picos y Pliego España (2001). Ubicación de las principales morfologías de génesis hipogénica (rojo) y de los espeleotemas identificados (amarillo): 1. Scallops, costras de alteración y cúpulas; 2. Canales de corrosión en techos; 3. Surcos de burbujas; 4. Boxwork; 5. Rellenos de calcita tipo “spar”; 6. Torres de coral; 7. Conos de calcita flotante; 8. Foliás y nubes de cuevas; 9. Acumulaciones de calcita flotante.

Metodología

Inventario de elementos de interés espeleológicos y muestreo de espeleotemas

Los espeleotemas y morfologías espeleogenéticas de la Sima de la Higuera fueron inventariados y fotografiados para su posterior clasificación y análisis. Con el fin de ubicar los elementos inventariados en el perfil de la cavidad (Figs. 1 y 2) se utilizó la topografía previamente realizada por los Clubs Cuatro Picos y Pliego España (2001). En particular, se realizó un inventario de los conos de calcita flotante presentes en la Sala Paraíso (-98 m). Su distribución espacial fue determinada mediante un medidor láser “Disto” de la marca comercial Leica. Se tomó como punto de referencia la estación 114 de la red topográfica, situada a 96 m de profundidad.

Por otro lado, se tomaron muestras de las formaciones tipo “boxwork” recubiertas de pátinas oscuras que se encuentran en la Galería del Manganeso, en los niveles profundos de la cavidad (-110 m) para su posterior análisis mineralógico y geoquímico mediante Difracción de Rayos X y microanálisis EDX, respectivamente. También se tomaron

muestras de las láminas de calcita flotante que aparecen en la Sala Paraíso para su observación mediante microscopía electrónica (SEM).

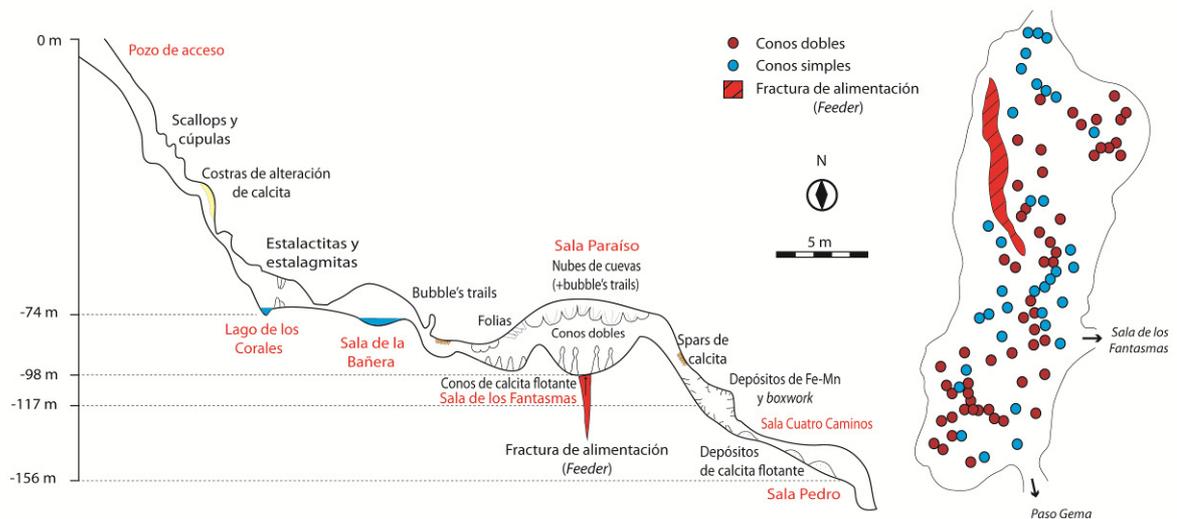


Figura 2. A. Ubicación de los principales elementos morfológicos y espeleotemas de la Sima de la Higuera sobre un alzado topográfico de la cavidad; B. Vista en planta de la Sala Paraíso y ubicación de los conos de calcita flotante simples (azul, n = 38) y dobles (rojo, n = 56).

Metodología analítica

Las microfotografías de SEM y los microanálisis semicuantitativos EDX (espectroscopía de energía dispersiva de Rayos X) se obtuvieron con un microscopio electrónico de barrido (SEM) HITACHI S-3500 acoplado a un detector de Rayos X Oxford INCA-7210 con una intensidad de corriente de 20 kV. Las muestras fueron previamente desecadas a temperatura ambiente y metalizadas con una capa de grafito para su mejor observación en modo de alto vacío. El diámetro del haz fue aproximadamente de 1 μm y el tamaño del punto analizado estuvo en torno a 1-5 μm . Los análisis obtenidos son de carácter semicuantitativo, en base a patrones virtuales de minerales recogidos en la base de datos del instrumento. El límite de detección de esta técnica permite analizar elementos mayoritarios en las muestras estudiadas tales como Fe, Mn, Pb, Ca y O con errores por debajo del 5 % en peso.

Por otro lado, los análisis mineralógicos mediante DRX (difracción de Rayos X) fueron efectuados a temperatura ambiente en un difractómetro BRUKER APEX CCD. Se usó la radiación de un cátodo de $\text{Mo}_{\text{K}\alpha}$ ($\lambda=0.71073\text{\AA}$) empleando el método de escaneado ω , dentro de los límites del ángulo $1.96 < \theta < 23.298$. Los análisis se efectuaron en el Área de Servicios Técnicos de la Universidad de Almería.

Resultados

Las observaciones realizadas permiten identificar hasta tres zonas morfológicamente distintas en la Sima de la Higuera:

(1) La boca de la sima da acceso a un pozo subvertical de 74 metros de profundidad que se desarrolla a lo largo de una diaclasa que discurre en dirección E-W y finalmente desemboca en la Sala de la Unión. Esta sala y las galerías con las que se comunica constituyen uno de los niveles superiores de la cavidad que discurren también en

dirección E-W. En esta área aparecen formas de cavernamiento freáticas como *scallops* (Fig. 3A), cúpulas o domos de corrosión. También se observan otras formas de disolución como son los tubos de burbujas (*bubble's trails*) (Fig. 3C) y costras de alteración constituidas por calcita micritizada (Fig. 3B). En este nivel se encuentran varios lagos colgados (Lago de los Corales y Sala de la Bañera) de pequeñas dimensiones que sugieren aportes de agua meteórica actual. La presencia de espeleotemas generados por goteo es poco frecuentes en esta cavidad aunque algunos ejemplares de estalactitas y estalagmitas aparecen en torno a estos lagos.

(2) A partir de este punto la cueva cambia considerablemente su morfología dando lugar a salas más amplias, como la Sala de los Fantasma o la Sala Paraíso (-98 m) que constituyen un nivel de profundidad intermedia. En esta área aparecen espeleotemas precipitados en condiciones subacuáticas, como rellenos de calcita esparítica, nubes de cuevas, folias, torres de coral o conos de calcita flotante. Éstos últimos aparecen especialmente en la Sala Paraíso, que tiene una superficie aproximada de 600 m² y donde se han inventariado hasta 94 conos, de los cuales 56 son “dobles” (Fig. 2). En la parte más profunda de esta sala se observa una fractura de 20 m de longitud que conecta directamente este nivel de la cueva con los sectores inferiores y podría haber dado lugar al ascenso de agua termal a modo de “feeder”.

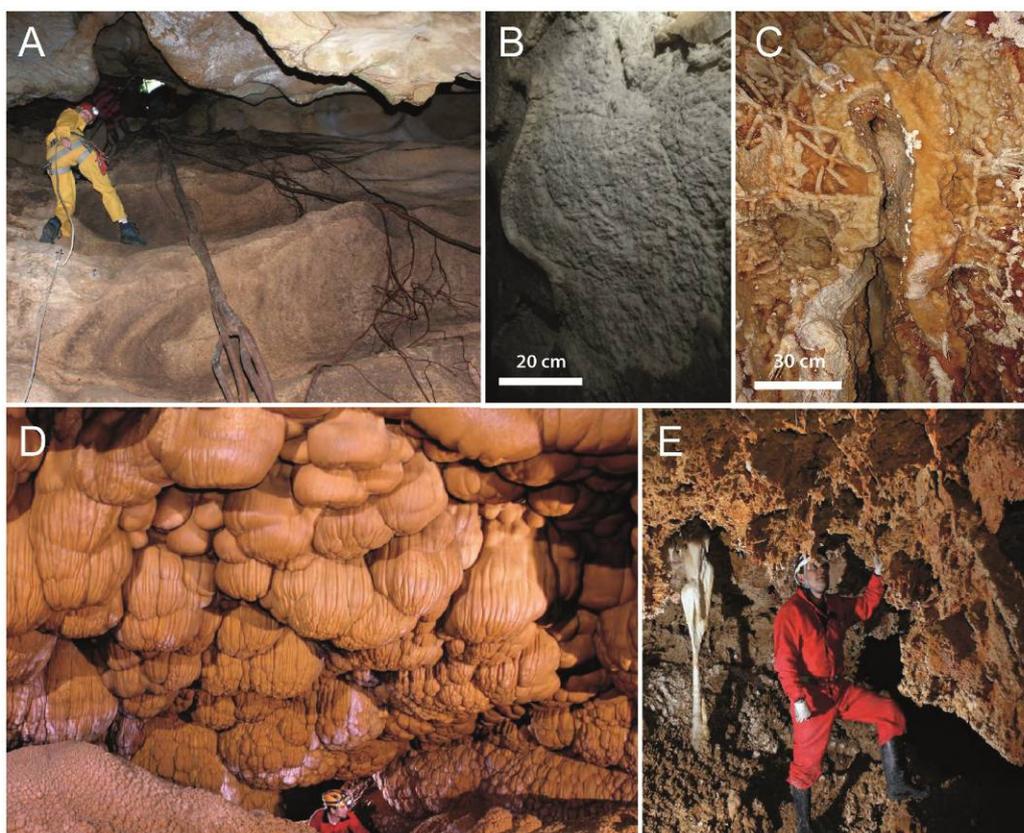


Figura 3. Formas de espeleogénesis hipogénica en la Sima de la Higuera: A. *Scallops* en el pozo de acceso a la cavidad; B. Costras de alteración constituidas por calcita micritizada; C. Tubos de burbujas y formaciones tipo “boxwork”; D. Surcos de burbujas a modo de hendiduras verticales sobre las “nubes” de la Sala de los Fantasma; E. Formas de corrosión ácida sobre el techo que aparecen en diversos lugares de la cavidad. (Fotos: Víctor Ferrer).

(3) Finalmente, los niveles más profundos comprenden galerías laberínticas (tipo “*maze cave*” tridimensional) de menores dimensiones, típicas de cavidades hipogénicas

(Klimchouk, 2009). En esta área, y especialmente en la Galería del Manganeso, se han identificado formaciones tipo “*boxwork*” a modo de láminas de calcita con textura sacaroidea que se dirigen desde la pared hacia el interior de las galerías dando lugar a estructuras tridimensionales (Fig. 4 H, I) (Gázquez *et al.*, 2012). Estas láminas están cubiertas de pátinas oscuras azuladas o grisáceas que también aparecen sobre los materiales carbonáticos de la roca de caja. La mineralogía de estos depósitos ha resultado estar compuesta por todorokita ($\text{NaMn}_6\text{O}_{12}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (22 %) y pirolusita (MnO_2) (16 %). También aparece calcita (42 %) y fases amorfas, probablemente constituidas por óxidos de Fe con baja cristalinidad, cuya presencia ha sido confirmada mediante microanálisis EDX. La concentración de Mn en estas pátinas oscila entre 29.2 - 38.2 % wt mientras que el Fe está presente entre 10.3 - 15.2 % wt. También aparecen Pb (8 % wt.) y Ba (2.7 % wt.) en algunos de los puntos analizados. Por otro lado, también en estos niveles aparecen importantes depósitos de calcita flotante de consistencia pulverulenta, especialmente en la Sala Cuatro Caminos (-117 m) (Fig. 4E).

Discusión

Formas de cavernamiento hipogénico

La Sima de la Higuera alberga una gran cantidad de elementos morfológicos poco convencionales que apuntan a que su origen es distinto del descrito tradicionalmente para cuevas epigénicas, generadas a partir de la infiltración de agua meteórica. En los niveles superiores y en el pozo de acceso aparecen elementos típicos de espeleogénesis hipogénica como son las costras de corrosión, constituidas por calcita micritizada (*micritized rind*) (Fig. 3B) cuyo origen está relacionado con la interacción entre el agua hidrotermal de carácter ácido y la roca de caja carbonática (Palmer y Palmer, 2012). Por otro lado, también se observan formas típicas de erosión freática, como son los *scallops*, en este caso de gran tamaño e indicando flujos lentos y ascendentes (Fig. 3A), así como cúpulas y domos de corrosión de poco desarrollo.

En los niveles intermedios, en torno a la Sala de la Bañera (-85 m), se han observado canales de corrosión (*bubble's trails*) en el techo (Fig. 3C), cuyo origen está relacionado con la interacción en condiciones freáticas entre la roca de caja carbonática y la fase gaseosa (“burbujas”) como consecuencia del alto contenido en CO_2 y/o H_2S que normalmente presenta el agua termal (Forti, 1996; Audra *et al.*, 2009). Por otro lado, sobre los espeleotemas tipo “nubes” que aparecen en el techo de la Sala de los Fantasmas se han observado surcos, en ocasiones de varios centímetros de profundidad, también relacionadas con la corrosión provocada por el ascenso de burbujas de CO_2 (Fig. 3D). La entrada de agua termal en los niveles intermedios de la cavidad se produjo principalmente a través de una gran fractura que aparece en la parte inferior de la Sala Paraíso (-98 m) y que se habría comportado como una vía preferencial de alimentación (*feeder*) de agua cargada en CO_2 de origen profundo y que ascendía a los sectores superiores a través de esta sala.

La morfología de la cueva en los niveles inferiores a la Sala Paraíso cambia considerablemente con respecto a los sectores más someros. La ausencia de formas de disolución preferencial debido al ascenso de burbujas de CO_2 da paso a formas de disolución freática tipo “*pendants*”. Estas diferencias morfológicas están relacionadas con los distintos mecanismos de disolución ácida condicionados por las diferencias en la presión hidrostática a la que estuvo sometido el CO_2 disuelto en el agua. Durante el

ascenso del agua hacia los niveles superiores la presión hidrostática disminuía, dando lugar a un aumento del volumen de la fase gaseosa y en consecuencia de las burbujas, que se canalizaban generando formas de disolución verticales y ascendentes (tubos y surcos de burbujas). Otras formas de corrosión, en este caso de carácter vadoso, aparecen en los niveles inferiores de la cavidad. En una etapa posterior a la precipitación de calcita hidrotermal en forma de venas que rellenan fracturas de la roca caja, el ascenso de aire caliente cargado de vapor de agua procedente de niveles más profundos dio lugar a condensación sobre las paredes de la Galería del Manganeso, cuya temperatura era ligeramente inferior a la del aire de origen profundo. El agua condensada provocó la disolución de la roca, proceso que pudo verse incrementados en consecuencia a la alta concentración de CO₂ en el aire de la cueva, que en la actualidad está en torno a 2000 ppm y pudo ser mayor en el pasado debido a la intensa desgasificación de CO₂ del agua hidrotermal que se encontraba por debajo de este nivel.

Durante este periodo se generaron elementos tipo “*boxwork*” constituidos por láminas de calcita de textura sacaroida que anteriormente rellanaban fracturas de la roca caja y que en la actualidad se proyectan desde las paredes y techos de la cavidad (Fig. 4 H,I). Este tipo de estructuras se formaron debido a la menor resistencia a la disolución que presenta la roca encajante con respecto a los rellenos carbonáticos hidrotermales. En la Galería del Manganeso el “*boxwork*” aparece visiblemente alterado y cubierto por pátinas oscuras azuladas que han resultado estar compuestas por óxidos de Fe y Mn. A escala microscópica, los óxidos aparecen como estructuras botroidales que cubren la calcita de textura fanerítica y notablemente alterada en consecuencia a la precipitación de estos óxidos. Es muy probable que estos elementos metálicos procedan del residuo de disolución de la roca caja, la cual se ha comprobado que es relativamente rica en Mn y Fe. Sin embargo, la actividad bacteriana podría haber jugado un papel fundamental para fijar tal cantidad Mn y Fe. Durante los procesos de oxidación de estos elementos se producen protones que acidifican el medio y que pudieron acelerar el proceso de formación del “*boxwork*” además de ser la causa de las formas de corrosión observadas sobre los cristales euhedrales de calcita (Fig. 5B).

Espeleotemas de origen hidrotermal

La gran mayoría de espeleotemas que aparecen en la Sima de la Higuera son de origen subacuático y precipitaron a partir de agua altamente saturada en carbonato cálcico. En general, este tipo de espeleotemas se generan como consecuencia del carácter hidrotermal de la disolución y al alto contenido en CO₂ de procedencia profunda relacionado con la génesis hipogénica de las cavidades. A pesar de ello, existen algunos pocos ejemplos de cavidades en las que este tipo de espeleotemas (conos de calcita flotante, folias...) precipitaron a baja temperatura en sistemas epigénicos (Plan y De Waele, 2011; Davis, 2012). Sin embargo, en el caso de la Sima de la Higuera, la elevada temperatura ambiental (que ronda los 20 °C en comparación con la temperatura media anual en el exterior que está en torno a 13,8 °C) es indicativa de que la cueva conserva cierto calor residual relacionado con su origen hipogénico.

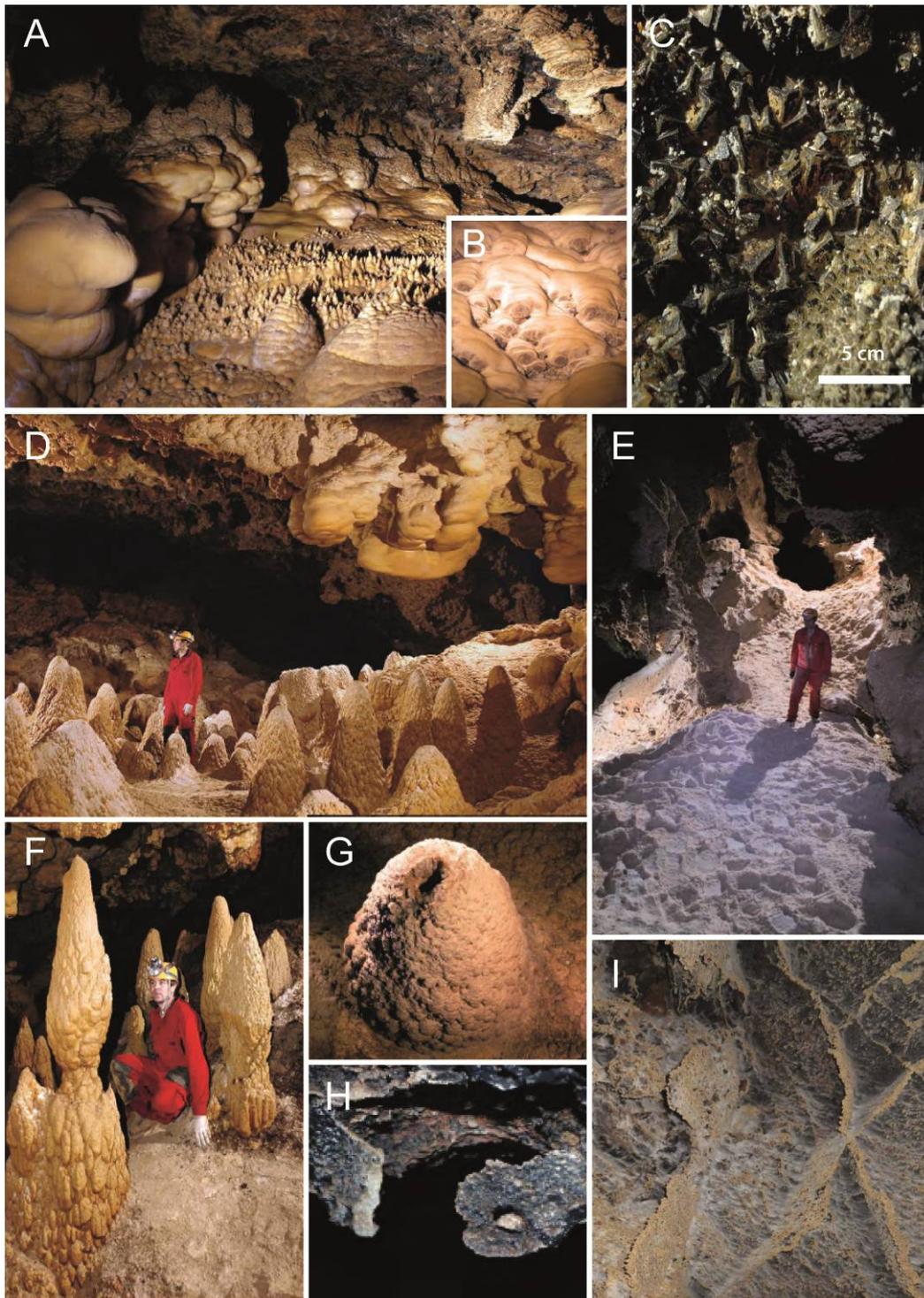


Figura 4. Espeleotemas relacionados con el origen hipogénico de la Sima de la Higuera. A Torres de coral (suelo), “nubes de cuevas” (pared) y folias (techo) en el nivel del Lago de la Bañera; B. Folias; C. Cristales de calcita tipo “spar” recubiertos por óxidos de Fe-Mn; D. Conos de calcita flotante y “nubes de cuevas” en la Sala de los Fantasmas; E. Acumulaciones de calcita flotante en la Sala Cuatro Caminos; F. Conos de calcita flotante “dobles” en la Sala Paraíso; G. Cono de calcita flotante a modo de “volcán” debido a un goteo agresivo en condiciones vadosas en la Sala de los Fantasmas; H e I. Boxwork cubierto de óxidos de Fe-Mn en la Galería del Manganese (Fotos: Víctor Ferrer)

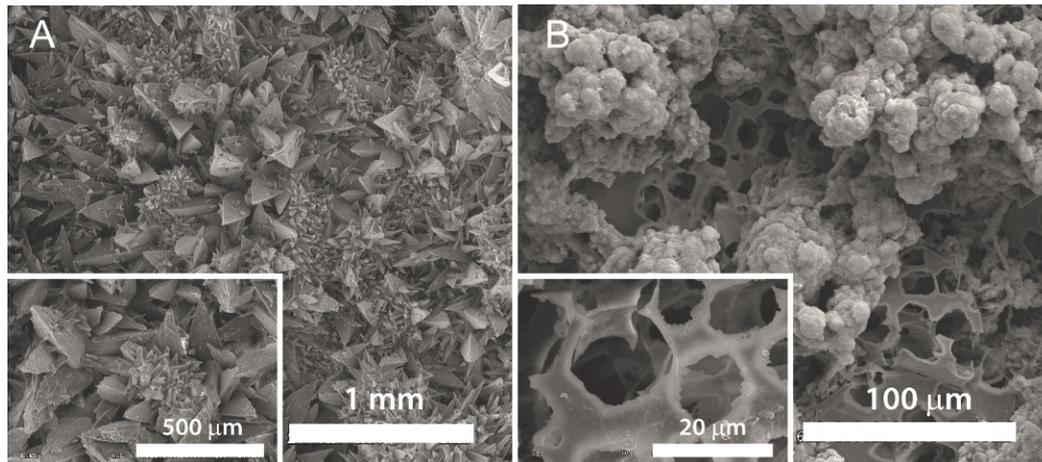


Figura 5. Imágenes de electrones secundarios (SEM): A. Láminas de calcita flotante de la Sala Paraíso; B. Superficie del boxwork ferromangánico de la Galería del Manganese. Notar la alteración del sustrato de calcita debido a la precipitación de óxidos que deja formas pseudo-hexagonales a modo de “fantasmas” de calcita.

En esta cavidad se ha observado una gradación en profundidad en cuanto a las características de los espeleotemas, que estuvieron controladas por el grado de saturación en carbonato cálcico de la disolución a su vez relacionado con la presión hidrostática a la que estaba sometida la solución. De este modo, en los niveles más profundos se produjo la precipitación de cristales de calcita de mayor tamaño (Fig. 4C), en relación a los procesos de desgasificación lenta y baja saturación en carbonato cálcico de la disolución. A medida que los fluidos ascendieron el proceso de desgasificación se intensificó y precipitaron otro tipo de espeleotemas freáticos, como por ejemplo las “nubes de cuevas” o las folias (Figs. 3D y 4A, B). Estas formaciones se generaron en zonas cercanas a la superficie freática, donde los procesos de desgasificación se hicieron más activo y dieron lugar a la precipitación de calcita sobre las paredes de las galerías, así como a la disolución de las formaciones del techo debido al ascenso de burbujas de CO₂.

En fases posteriores el nivel freático del acuífero descendió progresivamente. En esta situación trifásica (agua-aire-roca) se favoreció la precipitación de calcita flotante sobre la superficie del agua, debido a la intensa evaporación y desgasificación condicionadas por la gran diferencia de temperatura y $p\text{CO}_2$ entre el agua y el aire de la cueva. Este proceso pudo darse inicialmente en las galerías más superficiales, aunque las acumulaciones de calcita flotante son más escasas en estos niveles, probablemente debido a los procesos de erosión y disolución durante las fases vadosas más recientes. Sin embargo, estos depósitos aparecen con profusión en el resto de la cueva, siendo especialmente importantes en la Sala Paraíso (-98 m) y la Sala Cuatro Caminos (-117 m) (Fig. 4E). El hábito mineralógico de estas láminas vistas al microscopio electrónico es el de cristales bien facetados en forma de “dientes de perro” (*dogtooth calcite*) (Fig. 5A), típicos de calcita precipitada a baja-media temperatura (Lundberg *et al.*, 2000).

Ligados a la precipitación de estas láminas de calcita se formaron conos de calcita flotante que son especialmente espectaculares en la Sala de los Fantasmas (Fig. 4D) y en la Sala Paraíso (Fig. 4F). Estas formaciones epifreáticas están relacionadas con el hundimiento de láminas de calcita flotante debido al impacto continuado de goteos procedente del techo. La acumulación subacuática de estos depósitos sobre el suelo de

la cavidad da lugar a espeleotemas en forma de cono (Hill y Forti, 1997; Audra *et al.*, 2002). Sin embargo, de los 94 conos inventariados en la Sala Paraíso, 56 presentan la peculiaridad de ser “dobles”. Sobre un primer cono aparece un segundo, de similares características. Este hecho podría estar relacionado con las oscilaciones del nivel freático en torno al nivel de estas salas durante la génesis de estos espeleotemas.

Mediante el mismo mecanismo genético de hundimiento de láminas de calcita flotante se generaron las “torres de coral” que aparecen en torno al Lago de la Bañera. Sin embargo, en este caso la lámina de agua fue de escasos centímetros y el goteo sobre la misma estuvo mejor distribuido espacialmente. De este modo precipitaron pequeños conos de calcita con una altura media de entre 1 y 10 cm (Fig. 4A) y con mayor densidad espacial que en el caso de los conos gigantes de la Sala Paraíso.

Finalmente, cuando el nivel freático principal abandonó definitivamente la cavidad las condiciones freáticas tornaron a vadosas. En esta nueva situación se activaron los procesos de condensación y corrosión que afectaron especialmente a la roca caja, que había sido ya alterada durante la fase freática. En estas circunstancias también se produjo la disolución de la parte apical de algunos conos debido al goteo continuado de agua subsaturada en calcita, confiriendo a estos espeleotemas el aspecto de “volcanes” (Fig. 4G).

Conclusiones

Las características geomorfológicas y los espeleotemas peculiares de la Sima de la Higuera están relacionadas con el ascenso de fluidos de carácter hidrotermal. Desde el punto de vista espeleo-turístico esta cavidad sorprende al visitante debido a la gran diversidad de formas espeleotémicas poco convencionales y que en pocas ocasiones aparecen reunidas en una misma cueva. La singularidad de sus espeleotemas, como es el caso de los conos de calcita flotante “dobles” de la Sala Paraíso o de las formaciones tipo “*boxwork*” cubiertas por óxidos ferromanganesicos, le confiere un valor añadido como georecurso. Las medidas de gestión adoptadas por el Gobierno municipal y autonómico han consistido en la monitorización de los parámetros microclimáticos y la regulación el acceso a la sima desde su descubrimiento. Estas medidas han permitido que en la actualidad esta cavidad goce de un excelente estado de conservación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los fondos del Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la UAL, la beca predoctoral AP-2007-02799 del Ministerio de Ciencia e Innovación y el Proyecto “RLS Exomars Science” (Ministerio de Ciencia e Innovación y Fondos FEDER de la EU). Los autores agradecen a Víctor Ferrer las fotografías cedidas amablemente para ilustrar este trabajo y a Pepe Liza, Andrés Ros y Tomás Rodríguez por su colaboración desinteresada en el trabajo de campo. La topografía que aparece en el presente trabajo fue cortesía del Club de espeleología Cuatro Picos (Cartagena) y del Club Pliego-España (Pliego).

Bibliografía

- Audra, Ph., Bigot, J.Y. y Mocochain, L. 2002. Hypogenic caves in Provence (France). Specific features and sediments. *Acta Carsologica*, 31 (3), 33-50.
- Audra, Ph., Mocochain, L., Bigot, J.Y. y Nobécourt, J.C. 2009 The association between bubble trails and folia: a morphological and sedimentary indicator of hypogenic speleogenesis by degassing, example from Adaouste Cave (Provence, France). *International Journal of Speleology*, 38 (2), 93-102.
- Baños, J. 1995. Los baños terminales minero-medicinales de Alhama de Murcia. *Memorias de Arqueología*, 5, 354-381.
- Calaforra, J.M. y De Waele, J. 2011. New peculiar cave ceiling forms from Carlsbad Caverns (New Mexico, USA): the zenithal ceiling tube-holes. *Geomorphology*, 134, 43-48.
- Club Cuatro Pico y Club Pliego España. 2001. Sima de la Higuera. El mayor complejo subterráneo topografiado de la Región de Murcia. *Subterránea*, 16, 35-41.
- Davis, D.G. 2012. In defense of a fluctuating-interface, particle-accretion origin of folia. *International Journal of Speleology*, 41(2), 65-74.
- Ferrer, V. 2010. La Sima de la Higuera (Pliego-Murcia). 80 pp.
- Forti, P. 1996. Thermal karst systems. *Acta Carsologica*, 25, 99-117.
- Forti, P., Galdenzi, S. y Sarbu, S.M. 2002. The hypogenic caves: a powerful tool for the study of seeps and their environmental effects. *Continental shelf research*, 22, 2373-2386.
- Galdenzi, S. 2012. Corrosion of limestone tablets in sulfidic ground-water: measurements and speleogenetic implications. *International Journal of Speleology*, 41(2), 25-35.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M. y Rull, F. 2012. Boxwork and ferromanganese coatings in hypogenic caves: an example from Sima de la Higuera Cave (Murcia, SE Spain). *Geomorphology*, (en prensa).
- Hill, C.A. y Forti, P. 1997. Cave minerals of the World 2. National Speleological Society, Huntsville. 461 pp.
- Klimchouk, A.B. 2009. Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106, 100-117.
- Kampschuur, W., Langeberg, C.W., Montenat, Ch., Pignatelli, R. y Egeler, C.G. 1972. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 933 (Alcantarilla). IGME, Madrid.
- Lundberg, J., Ford, D.C. y Hill, C.A. 2000. A preliminary U-Pb date on cave spar, Big Canyon, Guadalupe Mountains, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 62(2), 144-148.
- Palmer, A.N. 2011. Distinction between epigenic and hypogenic maze caves. *Geomorphology*, 134, 9-22.
- Palmer M.V. y Palmer A.N. 2012. Petrographic and isotopic evidence for late-stage processes in sulfuric acid caves of the Guadalupe Mountains, New Mexico, USA. *International Journal of Speleology*, 41(2), 231-250.
- Pinuaga-Espejel, J.I., Martínez Parra, M., González Casal, I. 2000. Potencial hidromineral de la Región de Murcia. En: Panorama actual de las aguas minerales y Mineromedicinales en España. pp. 361-373. Madrid.
- Plan L. y De Waele J., 2011. Folia in der Odelsteinhöhle, Steiermark. Erstnachweis im deutschsprachigen Raum (Folia in Odelstein Cave, Styria first description from the German-speaking realm). *Die Höhle*, 62, 54-57.
- Sarbu, S.M. y Lascu, C. 1997. Condensation corrosion in Movile Cave. *Journal of Karst and Cave Studies*, 59, 99-102.