VI CONGRESO ESPAÑOL SOBRE CUEVAS LURISTICAS

El karst y el hombre: Las cuevas como Patrimonio Mundial

-seller









Editores: Bartolomé Andreo Navarro Juan José Durán Valsero Gázquez, F. et al. Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera y Sima Destapada (Región de Murcia). En: B. Andreo y J. J. Durán (Eds.), *El karst y el hombre: las cuevas como Patrimonio Mundial*. Nerja (Málaga). Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 283-294.

Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera y Sima Destapada (Región de Murcia)

F. Gázquez⁽¹⁾, J. M. Calaforra⁽²⁾, T. Rodríguez-Estrella⁽³⁾, A. Ros⁽⁴⁾, J. L. Llamusí⁽⁴⁾ y J. Sánchez⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Department of Earth Sciences, University of Cambridge, Downing Street, Cambridge, CB2 3EQ, United Kingdom f.gazquez@ual.es

⁽²⁾ Departamento de Biología y Geología. CAES Cambio Global, Universidad de Almería, Carretera de Sacramento s.n, La Cañada de San Urbano, Almería, 04720, España,

jmcalaforra@ual.es

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica, Universidad de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, Cartagena, 30203, España,

tomasrestrella@hotmail.com

⁽⁴⁾ Centro de Estudios Ambientales y del Mar. CENM-naturaleza, Alcántara, 5, Cartagena, Murcia, 30394, España cenm@cenm.es

RESUMEN

La Región de Murcia alberga un importante número de cavidades cuyo origen ha sido recientemente atribuido a procesos hipogénicos. Los mecanismos que las generaron no estuvieron directamente relacionados con la infiltración de agua de lluvia, sino con la acción de flujos de aguas de procedencia relativamente profunda. Hasta la fecha, los criterios utilizados para clasificar estas cavidades como hipogénicas has sido de carácter morfológico, tanto mediante la identificación de formas de disolución y corrosión típicas de este tipo de mecanismos (cúpulas, domos de corrosión, outlets y feeders, etc...) como por la presencia de espeleotemas generalmente formados a partir de aguas termales (conos y nubes, folias, spar de calcita, etc...). El estudio de las características isotópicas del carbonato (δ^{18} O y δ^{13} C) en estos espeleotemas puede proporcionar información sobre la temperatura a la cual precipitaron. En este trabajo se ha estudiado de forma preliminar la composición isotópica de una selección de espeleotemas procedentes de dos cavidades hipogénicas de la Región de Murcia: Sima de la Higuera (Pliego) y Sima Destapada (Cartagena). En Sima de la Higuera, la primera fase de precipitación de calcita hidrotermal quedó reflejada en forma de rellenos de calcita con textura sacaroidea que precipitó en fisuras de la roca encajante probablemente a temperaturas en torno a 50°C, constituyendo posteriormente el boxwork característico de muchas zonas de la cavidad. Más tarde la temperatura del agua pudo haber disminuido, dando lugar a spar de calcita (~28°C) y láminas de calcita flotante sobre la superficie del agua (~26-28°C), cuya acumulación generó los espectaculares conos de calcita flotante de la Sala Paraíso. La temperatura de la cueva siguió disminuyendo hasta los 21°C actuales. En Sima Destapada, cristales euhedrales de calcita precipitaron en el interior de fracturas de la roca encajante, inicialmente a partir de agua con temperaturas que pudieron oscilar en torno a 50°C, y posteriormente disminuyó hasta ~38°C. La temperatura actual del agua en esta cavidad es de 31°C. El estudio isotópico y geocronológico de espeleotemas en estas y otras cavidades de la Región de Murcia, podrían permitir establecer un patrón de enfriamiento de las aguas termales a escala regional.

Palabras clave: cuevas hipogénicas, espeleotemas hidrotermales, isotopos estables.

Preliminary geochemical evidence for the hydrothermal origin of Sima de la Higuera and Sima Destapada (Murcia Region)

F. Gázquez, et al. 2016. Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera y Sima Destapada (Región de Murcia)

ABSTRACT

The Murcia Region accommodates a number of caves, which origin has been recently attributed to hypogenic mechanisms. The processes that generated these cavities were not directly connected to seepage of rainwater but to the action of deep water flows. To date, criteria for classification of these cavities have been based on the identification of morphological features, either dissolution forms typically originated by hypogene speleogenesis (cupolas, corrosion domes, outlets and feeders, etc.) or the presence of speleothems typically formed from hydrothermal waters (cave cones and clouds, folia, calcite spar, etc.). The analysis of stable isotopes ($\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$) in this type of speleothems can provide further information of their temperature of formation. Here, we study the isotopic composition of a selection of speleothems from two hypogenic caves in the Murcia Region: Sima de la Higuera (Pliego) y Sima Destapada (Cartagena). In Sima de la Higuera, the first stages of calcite formation produced sugary-texture calcite precipitation in cracks of the hostrock at temperature that may be around 50°C, which in later stages formed the boxwork structures studied in previous works on this cave. Subsequently, water temperature might have dropped and calcite spars crystallized at ~28°C, in addition to calcite rafts on the water surface when the cave was partially flooded by the thermal aquifer (~26-28°C). Accumulation of calcite rafts gave rise to the spectacular calcite raft cones of the Paradise Chamber. The cave temperature continued decreasing to current conditions (21°C). In Sima Destapada, calcite infillings in cracks of the host rock formed in two stages, first at temperature around ~50°C and later at around ~38°C. Today, water temperature is 31°C. The isotopic and geochronological characterization of speleothems in these and other cave of the Murcia Region will enable to stablish a regional pattern of thermal water cooling.

Keywords: hydrothermal speleothems, hypogenic caves, stable isotopes.

Introducción

Las investigaciones relacionadas con morfologías subterráneas generadas por el ascenso de flujos de agua de origen relativamente profundo (en ocasiones termal) han proliferado considerablemente durante los últimos años (Klimchouk, 2009; Palmer, 2011, entre otros muchos). De hecho, hoy en día se estima que entre el 5 y el 10% de las cavidades a escala mundial podrían haber sido generadas por este tipo de mecanismos (Audra y Palmer, 2015). Hasta tiempos recientes las cuevas de origen hipogénico habían sido consideradas como una anomalía y su estudio generaba escaso interés. En este contexto, varias cuevas de la Región de Murcia han sido objeto de investigaciones recientes, centradas principalmente en el estudio de sus morfologías de origen hipogénico (Ros et al., 2011, 2014a, b; Asencio y Aboal, 2011; González-Ramón et al., 2014; Gázquez et al., 2012, 2013; 2016). La presencia de acuíferos hidrotermales, que en ocasiones alcanzan los 50°C, y la temperatura "anómala" del aire, superior a la media del ambiente exterior, indica que los procesos de origen profundo siguen aún activos en muchas zonas de la Región de Murcia. Este hecho, junto con la caracterización de morfologías y espeleotemas típicamente generados por procesos hipogénicos y/o hidrotermales, también descritos en otras cuevas a escala mundial, han sido los indicadores utilizados para caracterizar como hipogénicas hasta 14 cuevas de la Región de Murcia (Gázquez et al., 2016).

El estudio de las características geoquímicas de espeleotemas, y más concretamente su composición isotópica (δ^{18} O) puede ayudar a determinar la temperatura del agua en la cueva en el momento de su precipitación. Esto se debe a que el fraccionamiento isotópico del oxígeno entre el HCO₃²⁻ disuelto y el carbonato precipitado depende de la temperatura del agua (Tremaine *et al.*, 2011). Esta relación viene dada por la expresión:

1000 ln α = 16.1 (10³ *T*⁻¹) – 24.6 (Ecuación 1)

Donde α es el fraccionamiento isotópico entre el oxígeno del HCO₃⁻ disuelto (cuya composición isotópica en el equilibrio es igual a la del oxígeno del agua) y el carbonato (CaCO₃) del espeleotema, y T es la temperatura del agua en grados Kelvin. Por otro lado, los isótopos de carbono (δ^{13} C) de la calcita pueden aportar información sobre la fuente de carbono a la disolución (ej. disolución de la roca de caja, CO₂ procedente del suelo, etc.) (Lambert y Aharon, 2011). En el presente trabajo, se ha analizado la composición isotópica del oxígeno y el carbono en espeleotemas y rellenos de carbonatos hidrotermales en Sima de la Higuera (Pliego) y Sima Destapada (Cartagena), con el fin de hacer una primera aproximación geoquímica a los procesos que los generaron, así como a la temperatura del agua en el momento de la precipitación del carbonato.

Entorno geológico y descripción de las cuevas

La Sima de la Higuera (485 m s.n.m) está ubicada en la Sierra de Espuña, en el término municipal de Pliego (Región de Murcia). Su desarrollo conocido es de 5500 metros, con una profundidad máxima explorada de 156 metros con respecto a la entrada de su pozo de acceso (Fig. 1). La cavidad se desarrolla en calcarenitas y calizas del Oligoceno 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. En el entorno de la cueva existen sondeos que explotan aguas con temperaturas de entorno a 32°C. Estos pozos extraen agua del acuífero de El Bosque, en el cual se encuentra esta cavidad (Rodríguez-Estrella, 2015).

La cueva presenta claras evidencias de su origen hipogénico, como por ejemplo, la presencia de formas de disolución específicas de cavidades hipogénicas, así como espeleotemas relacionados típicamente con este tipo de sistemas hidrotermales (Gázquez y Calaforra, 2013). También su elevada temperatura ambiental (hasta 21,7°C) con respecto a la media exterior (~17°C), aumentando ligeramente hacia las zonas más profundas, indica una importante anomalía térmica positiva que podría apuntar a un origen relativamente reciente.

Sima Destapada está ubicada en el Golfo de Mazarrón, en la costa sudeste de la Región de Murcia, cerca de la localidad de Isla Plana. La entrada de la cavidad se encuentra en el Cabezo de Horno, a 285 m s.n.m y fue descubierta en 1975 aunque las exploraciones se desarrollaron en la década de los 80s. Su recorrido actual topografiado es de 3.300 m, con una profundidad máxima conocida de 221 m de galerías vadosas (Ros *et al.*, 1988, Ros *et al.*, 2015). La cavidad se desarrolla en mármoles, dolomías y calizas triásicas. En ocasiones aparecen filitas, cuarcitas, esquistos y calcarenitas rojizas del Permo-Trias, pertenecientes al complejo Alpujárride.

Desde el punto de vista hidrogeológico, Sima Destapada se encuentra dentro del acuífero de Vértice Hornos cuyo principal manantial daba lugar a los baños termales de la Marrana (hoy inutilizados). Los niveles inferiores de la cueva, por debajo del nivel -221 m desde la entrada, se encuentran sumergidos en agua termal (31°C). Trabajos de espeleobuceo recientes han topografiado una nueva red de galerías laberínticas sumergidas de 400 m de recorrido. En todos los niveles de la cavidad aparecen signos evidentes de espeleogenesis hipogénica, incluyendo

F. Gázquez, et al. 2016. Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera y Sima Destapada (Región de Murcia)



Figura 1. Morfologías y espeleotemas de origen hipogénico. I) Sima de la Higuera: A. Nubes y conos de cuevas, B. Folias y C. Conos dobles de calcita flotante; II) Sima Destapada: D. Conductos ascendentes de disolución (solutional pockets); E. Pendants y partitions; F. Morfologías típicas de galerías freáticas (Fotografías: Andrés Ros, Jose Luis Llamusi y Victor Ferrer)

domos de corrosión y cúpulas, *scallops* verticales, conductos ascendentes (*feeders* y *outlets*), canales de burbujas, *pendants*, etc. (Gázquez *et al.,* 2016) (Fig. 1).

Metodología

Descripción de las muestras

En Sima de la Higuera se tomó una muestra de calcita de textura sacaroidea (HG-01) precipitada en el interior de fracturas de la roca de caja, en la Galería del Manganeso (-110 m). En algunos casos, la calcita forma láminas que sobresalen varias decenas de centímetros de la pared de la cavidad, a modo de *boxwork* y aparecen cubiertas por óxidos de hierro y manganeso (Gázquez *et al.*, 2012) (Fig. 2A). A la profundidad de 80 m, se tomaron muestras de cristales de calcita euhedrales de 3-4 centímetros de tamaño (HG-02) que aparecen expuestos en las paredes de Galería de los Lagos (Fig. 2B). En la Sala Paraíso (-85 m), se tomaron láminas de calcita flotante (HG-03) depositadas sobre otros espeleotemas de origen subacuático que aparecen en este nivel (Gázquez y Calaforra, 2013) (Fig. 2C). Además, se tomó una muestra de polvo de calcita flotante (HG-04) de los depósitos de arenas de calcita de la Sala Cuatro Caminos (-117 m) (Fig. 2D). Finalmente, se muestreó la roca de caja carbonática, en la Sala de la Bañera (HG-05) y en el exterior de la cavidad (HG-06). Además de muestras sólidas, se tomaron 8 muestras de agua de lagos y goteos en el interior de la cavidad en campañas muestreo llevadas a cabo en septiembre de 2011 y mayo de 2012.

En Sima Destapada se tomaron dos muestras de rellenos de calcita (*solutional pocket*) que aparecen a modo de geodas en fracturas de la roca de caja; una muestra de calcita rojiza macrocristalina (DES-01) que forma parte de una lámina de aproximadamente 10 cm de espesor y otra de la parte central constituida por rellenos de calcita blanca microcristalina (DES-02) (Fig. 2E). También se tomaron dos muestras del agua dulce (7-8 mS/cm) en la que se encuentra sumergida la parte más profunda de la cavidad.

Análisis isotópicos

Para el análisis isotópico de los carbonatos se utilizó un dispositivo Gas Bench II (Thermo Scientific) de preparación de muestras para análisis isotópico acoplado a un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas MAT253 (Thermo Scientific) en el Godwin Laboratory de la Universidad de Cambridge, Reino Unido. La composición isotópica del oxígeno y el carbono (δ^{18} O y δ^{13} C) esta estandarizada con respecto al patrón internacional V-PDB. La reproducibilidad del método fue de ±0.1‰ (1 σ) para δ^{18} O y δ^{13} C, basada en el análisis de patrones internos. Los valores de las muestras se encuentran dentro de la recta de calibración obtenida con estos estándares. Los datos de δ^{18} O_{VPDB} fueron convertidos a V-SMOW mediante la fórmula de Coplen (1995) para su comparación con los valores de las aguas.

La composición isotópica de las muestras de agua (δ^{18} O y δ D) se analizó con un Picarro L-1102-i en el Godwin Laboratory de la Universidad de Cambridge (Reino Unido). La composición isotópica del oxígeno y el hidrogeno (δ^{18} O y δ D) esta estandarizada con respecto al patrón internacional V-SMOW. Para la calibración de los datos isotópicos se utilizaron cuatro estándares internos calibrados previamente con respecto a los estándares internacionales V-SMOW, F. Gázquez, et al. 2016. Evidencias geoquímicas preliminares del origen hidrotermal de Sima de la Higuera y Sima Destapada (Región de Murcia)



Figura 2. Espeleotemas analizados en este estudio. I) Sima de la Higuera: A. Boxwork de calcita sacaroidea cubiertos por patinas de Fe y Mn, B. Spar de calcita, C. Láminas de calcita flotante y D. "Arenas" de calcita flotante. II) Sima Destapada: E. Rellenos de calcita esparítica en oquedades de la roca de caja (Fotos: Andrés Ros, Víctor Ferrer y José María Calaforra)

GISP y SLAP. La reproducibilidad (1 σ) de los análisis fue de 0.05‰ para δ^{18} O y de 0.4‰ para δ D, basada en 6 análisis consecutivos de cada muestra.

Microfotografías de microscopia electrónica de barrido electrónico

El hábito cristalino de los minerales fue estudiado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, *Secondary Electron Microscopy*). Las microfotogracias se tomaron con un equipo HITA-CHI S-3500 en el Área de Servicios Técnicos de la Universidad de Almería.

Resultados

La composición isotópica de los rellenos de calcita y espeleotemas de Sima de la Higuera osciló entre -2.7‰ y -7.8‰ para δ^{13} C y entre -7.8‰ y -12.0‰ para δ^{18} O. Estos valores de δ^{13} C y δ^{18} O son más negativos que los observados en la roca de caja (-1.0±1.2‰ y -4.0±2.5‰ para δ^{13} C y δ^{18} O, respectivamente) (Tabla 1). La composición isotópica de las aguas de goteo y lagos presenta un valor muy homogéneo en torno a -6.5±0.2‰ para δ^{18} O y de -38.3±1.3‰ para δ D (V-SMOW). La muestra de rellenos de calcita microcristalina (HG-01) está constituida por cristales de calcita euhedrales de hasta 100 µm de tamaño. En el caso de la muestra de láminas de calcita flotante (HG-03), al microscopio electrónico se observan cristales de calcita tipo "dientes de perro", típicamente relacionados con precipitación de calcita en condiciones hidrotermales (Gázquez y Calaforra, 2013). La muestra de polvo de calcita flotante (HG-04) muestra un aspecto microscópico similar, aunque la superficie de los cristales aparece claramente erosionada. En Sima Destapada, la composición isotópica del carbono (δ^{13} C) de los rellenos de calcita analizados muestra valores de -1.1‰ y -5.3‰ en las muestras rojiza y blanca, respectivamente. En cuanto a δ^{18} O, su valor fue de -10.5‰ en la muestra de calcita esparítica rojiza y de -8.2‰ en la de calcita microcristalina blanca. El análisis las dos muestras de agua analizadas produjo un valor medio de -4.8±0.1‰ para δ^{18} O y de -30.1±0.1‰ para δ D.

Muestra	Cavidad	Descripción	δ¹³C (‰)	δ ¹⁸ Ο (‰)	Tª (°C)
HG-01	Higuera	Láminas de calcita microcristalina formando boxwork (-110 m)	-2,7	-11,9	51
HG-02	Higuera	<i>Spars</i> de calcita (-80 m)	-6,7	-8,2	28
HG-03	Higuera	Láminas de calcita flotante (-85 m)	-7,8	-7,8	26
HG-04	Higuera	Arenas de calcita flotante (-117 m)	-7,8	-8,3	28
HG-05	Higuera	Roca de caja (-85 m)	-0,1	-2,2	-
HG-06	Higuera	Roca de caja (exterior)	-1,8	-5,8	-
DES-01	Destapada	Calcita esparítica rojiza	-1,1	-10,5	51
DES-02	Destapada	Calcita microcristalina blanca	-5,3	-8,2	37

Tabla 1. Composición isotópica de las muestras analizadas y temperatura calculada a partir de la ecuación de Tremaine et al. (2011) y el valor de δ^{18} O en el agua de goteo actual en Sima de la Higuera y Sima Destapada

Discusión

Determinación de temperaturas de formación y posibles incertidumbres

Las temperaturas de precipitación de los espeleotemas han sido calculadas asumiendo la condición de equilibrio isotópico entre δ^{18} O en el agua y en el carbonato a partir de la Ecuación 1 (Tremaine *et al.*, 2011), donde α es el fraccionamiento isotópico, o lo que es lo mismo, la diferencia absoluta entre δ^{18} O en el carbonato y en el agua a partir de la que precipitó el espeleotema, ambos calibrados respecto a V-SMOW. Dado que el valor de δ^{18} O en la disolución en el momento de la precipitación de los espeleotemas es desconocido, para los cálculos se ha utilizado el valor medio de δ^{18} O en el agua actual de las cuevas. La composición isotópica del agua de infiltración en cuevas suele representar la media del agua de precipitación en su entorno, al igual que ocurre con los acuíferos.

Aunque este valor en el agua del acuífero podría haber cambiado ligeramente desde el momento en el que estos espeleotemas precipitaron, existen indicadores que apuntan a que esta diferencia pudo ser casi despreciable con respecto al valor de δ^{18} O en al agua meteórica actual en el entorno de la cueva, y por ello en el agua de goteo y en los acuíferos del entorno. Por ejemplo, estudios sobre las variaciones en δ^{18} O en aguas subterráneas recientes y otras más antiguas, del último máximo glacial (~18.000 años antes del presente) han puesto de manifiesto que en el sur de España, el valor de δ^{18} O en precipitación no ha experimentado cambios significativos entre estos dos periodos de condiciones climáticas tan distintas (Jasechko *et al.*, 2015). No obstante, cabe destacar que un cambio de 0.18‰ en δ^{18} O en la composición isotópica del agua da lugar a una variación de un grado centígrado sobre la temperatura de formación estimada (Tremaine *et al.*, 2001). Por ejemplo, en el hipotético caso de que el valor de δ^{18} O en el agua original hubiera sido 1‰ más negativo, los valores de temperatura estimados habrían sido en torno a 5°C más bajos.

Evidencias del hidrotermalismo en Sima de la Higuera

Sima de la Higuera alberga una gran diversidad de elementos morfológicos poco convencionales que apuntan a su origen es hipogénico (Gázquez y Calaforra, 2013) (Fig. 1). 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 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, así como cúpulas y domos de corrosión.

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, 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 (Gázquez y Calaforra, 2013). Por otro lado, sobre los espeleotemas tipo "nubes" (*clouds*) 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 .

Durante las primeras etapas de formación de la cueva, probablemente incluso antes de que se desarrollaran sus grandes volúmenes, se produjo la precipitación de rellenos de calcita en fracturas de la roca de caja. La composición isotópica de estos rellenos ($\delta^{13}C = -2.7\% \text{ y} \delta^{18}O = -11.9\%$) de textura sacaroidea (Fig. 3A) difiere considerablemente de la del carbonato de la roca encajante ($-1.0\pm1.2\%$ y $-4.0\pm2.5\%$ para $\delta^{13}C$ y $\delta^{18}O$, respectivamente). Los cálculos de temperatura a partir de la ecuación propuesta por Treiman *et al.* (2011) indican que estos rellenos podrían haber precipitado a temperatura en torno a 51°C. En una etapa posterior, después de que se formaran las galerías principales de la cueva y en condiciones subaéreas, el ascenso de aire caliente cargado de vapor de agua procedente de niveles más profundos dio lugar a condensación sobre las paredes de las galerías. Durante este periodo se generaron elementos tipo "boxwork" constituidos por las mismas láminas de calcita que anteriormente rellenaban fracturas de la roca caja y que en la actualidad se proyectan desde las paredes y techos de la cavidad. 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 (Gázquez *et al.*, 2012).

Cristales euhedrales de calcita ($\delta^{13}C$ = -6.9‰ y $\delta^{18}O$ = -8.2‰) precipitaron en la superficie de paredes y techos en los niveles intermedios (-80 a -90 m de profundidad). La temperatura del agua en el momento de su formación pudo ser de aproximadamente 28°C y probablemente



Figura 3. Microfotografías de microscopio electrónico de barrido (SEM) en espeleotemas de Sima de la Higuera: A. Cristales de calcita sacaroidea rellenando fracturas de la roca de caja; B. Cristales de calcita en forma de "dientes de perro" en láminas de calcita flotante; C. Arenas de calcita flotante, cuyos cristales aparecen parcialmente erosiona/disueltos dos debido a su transporte y exposición subaérea

ocurrió en condiciones epifreáticas, en una situación de alta estabilidad que favoreció la desgasificación lenta de CO₂ que permite la precipitación de cristales de gran tamaño.

En fases posteriores el nivel freático del acuífero descendió progresivamente. En esta situación en la que existía un atmósfera gaseosa en la cueva, se favoreció la precipitación de calcita flotante (δ^{13} C= -7.8‰ y δ^{18} O= -7.8 a -8.3‰) sobre la superficie del agua a temperaturas que pudieron estar en torno a 26-28°C. Este proceso comenzó 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 abundantemente 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 depositadas sobre otros espeleotemas y vistas al microscopio electrónico es el de cristales en forma de "dientes de perro" (*dogtooth calcite*) (Fig. 3B), típicos de calcita flotante desde los niveles superiores a los más profundos dio lugar a la erosión mecánica de las láminas, generando los depósitos de arenas blancas de la Sala Cuatro Caminos. La erosión produjo el desgaste de las aristas de los microcristales que forman la calcita flotante, como se pude observar en la Figura 3C.

Cabe destacar que los valores de δ^{13} C disminuyeron desde las primeras fases de precipitación de rellenos de calcita (-2.7‰) hasta las últimas de formación de calcita flotante (-7.8‰), lo que sugiere que la disolución de la roca de caja (-1.0±1.2‰) fue inicialmente la fuente mayoritaria de carbonato al sistema. En las siguientes fases de formación de espeleotemas, hubo contribuciones importantes de CO₂ edáfico al acuífero, que podría haberse debido a un aumento de la producción vegetal en el suelo, que presenta valor de δ^{13} C más negativos (de entre -24‰ y -12.5‰, dependiendo del tipo de vegetación; O'Leary, 1981).

Evidencias del hidrotermalismo en Sima Destapada

En Sima Destapada, existen pozos de hasta 50 m de profundidad que conectan los niveles intermedios de la cavidad con el acuífero hidrotermal, cuya temperatura actual es de 31°C. Estos conductos verticales podrían haber actuado en el pasado como canales de alimentación

(*feeders*) de agua termal al sistema, muy comunes en cuevas hipogénicas. También se han observado conductos ciegos verticales en suelos y techos, así como grietas producida por el ascenso de agua termal (*ceiling dissolution pockets*) (Fig. 1D). En algunas ocasiones, la disolución de las paredes de la cavidad produjo la aparición de pilares aislados (*partitions y pendants*) que en algunos casos llegaron a desaparecer produciéndose así la conexión de salas o pasajes adyacentes (Fig. 1E). Otros elementos típicos de cuevas hipogénicas que también aparecen en Sima Destapada son los pasajes con sección en forma de "llave", cuyo techo está constituido por un canal semiesférico (Fig. 1F), así como canales verticales de burbujas.

En muchas localizaciones de la cueva aparecen rellenos de calcita en fracturas de la roca de caja, a modo de geodas, que contienen cristales de calcita formados en dos fases. Según el geotermómetro isotópico, los cristales euhedrales de calcita rojiza ($\delta^{13}C = -1.14\%$ y $\delta^{18}O = -10.47\%$) habrían precipitado a temperaturas en torno a 51°C, asumiendo que la composición isotópica del agua no ha sufrido cambios significativos y fue similar a la actual. Posteriormente, la temperatura del acuífero pudo disminuir hasta 37°C, tal y como quedó registrado en los isotopos de la calcita microcristalina ($\delta^{13}C = -5.31\%$ y $\delta^{18}O = -8.20\%$) que rellena la parte más interna de las fracturas. Posteriormente, la temperatura del agua habría seguido disminuyendo hasta los 31°C actuales. Los valores de $\delta^{13}C$ más elevados en la primera fase de precipitación indicarían que la fuente de carbono en esta etapa podría haber estado relacionada con la disolución de la roca carbonática triásica. Por el contrario los valores de $\delta^{13}C$ más negativos observados durante la segunda fase de precipitación de calcita microcristalina podrían estar relacionados con aportes más importantes de CO₂ procedente de la vegetación y el suelo sobre la cavidad en periodos más recientes.

Conclusiones y trabajos futuros

Los procesos de espeleogénesis hipogénica responsables de la formación de Sima de la Higuera y Sima Destapada han dejado evidencias geomorfológicas como resultado de los mecanismos de disolución hidrotermal de la roca de caja carbonática. Estos indicadores morfológicos son similares a los observados en otras cavidades hipogénicas a escala mundial. Los resultados isotópicos de espeleotemas formados en condiciones subacuáticas en ambas cuevas parecen confirmar esta hipótesis. Tanto en Sima de la Higuera como en Sima Destapada, las evidencias que apuntan a una primera fase de precipitación de hidrotermal vienen dadas por la presencia de rellenos de cristales de calcita esparítica en fracturas de la roca de caja que habrían precipitado a temperaturas en torno a 50°C, siempre asumiendo que la composición isotópica del agua en el momento de la precipitación fue similar a la del agua actual en la cueva. Posteriormente, la temperatura de ambos acuíferos habría disminuido para dar lugar a espeleotemas a temperaturas más bajas de entre 38 y 26°C.

En trabajos futuros, mediante el análisis de isotopos estables de las inclusiones fluidas de estos espeleotemas se podrá precisar su temperatura de formación de forma más exacta, eliminado así las incertidumbres debidas a posibles variaciones en la composición isotópica del agua del acuífero en el momento de la precipitación. El estudio detallado de la geocronología de estos espeleotemas y la geoquímica isotópica de otros carbonatos en cuevas de la Región de Murcia

podría revelar la evolución de la temperatura y la posición del nivel freático de los acuíferos a escala regional.

Agradecimientos

Los autores agradecen su esfuerzo a todos los espeleólogos que han colaborado en la exploración de estas cavidades durante los últimos 20 años. Agradecemos a la Dra. Esmeralda Urea (Área de Servicios Técnicos, Universidad de Almería) su ayuda durante la realización de análisis de microscopia electrónica, a James Rolfe durante el análisis isotópico de los carbonatos y al Profesor David Hodell por prestar las facilidades necesarias. Los análisis realizados en este trabajo han sido financiados por los fondos del Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Geología Ambiental de la Universidad de Almería y el Godwin Laboratory de la Universidad de Cambridge. Parte de los materiales utilizados para la exploración de estas cavidades han estado patrocinados por RODCLE®.

Referencias

- Asencio, A.D. y Aboal, M. 2011. In situ acetylene reduction activity of *Scytonema julianum* in Vapor cave (Spain). *International Journal of Speleololgy*, 40: 17-21.
- Audra, Ph. y Palmer, A. 2015. Research frontiers in speleogenesis. Dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. *Acta Carsologica*, 44(3): 315-348.
- Coplen, T.B. 1995. Reporting of stable carbon, hydrogen, and oxygen isotopic abundances. In: Reference and intercomparison materials for stable isotopes of light elements. *International Atomic Energy Agency*, TECDOC, pp. 31-34.
- 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*, 117-118: 158-166.
- Gázquez, F. y Calaforra, J.M. 2013. Hypogenic speleogenesis and speleothems of Sima de la Higuera (Murcia, southeast Spain). *16th International Congress of Speleology*, Brno. Vol III: 78-83.
- Gázquez, F. y Calaforra, J.M. 2013. Origin of double-tower raft cones in hypogenic caves. *Earth Surface and Land Processes*, 38: 1655–1661.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Ros, A., Llamusí, J.L. y Sánchez, J. 2016. Hypogenic morphologies and speleothems in caves of the Murcia Region, south-eastern Spain. *Proceeding of the 3rd International Deepkarst conference*, Carlsbad. En prensa.
- González-Ramón, A., Segura-Herrera, A., Sánchez-Díaz, T.J., Ignatenko, A., Gea-López, R.D., Pérez-Martínez, P., Belmonte-Jiménez, G. y Carra-Vélez, R. 2014. La cueva de Luchena, un ejemplo de cavidad hipogénica relacionada con descargas de aguas subterráneas en el acuífero Pericay-Luchena (Lorca, Murcia). En: *Iberoamérica Subterránea*. (Ed. J.M. Calaforra and J.J. Durán). Asociación Española de Cuevas Turística. 321-331.
- Jasechko, S., Lechler, A., Pausata, F.S.R., Faweett, P.J., Gleeson, T., Cerdon, D.I., Galewsky, J., LeGrande, A.N., Risi, C., Sharp, Z.D., Welker, J.M., Werner, M. y Yoshimura, K. 2015. Late-glacial to late-Holocene shifts in global precipitation δ¹⁸O. *Climate of the Past*, 11: 1375-1393.

Klimchouk, A.B. 2009. Morphogenesis of hypogenic caves. Geomorphology, 106: 100-117.

Lambert, W.J. y Aharon, P. 2011. Controls on dissolved inorganic carbon and δ^{13} C in cave waters from DeSoto Caverns: Implications for speleothems δ^{13} C assessments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 753-768.

O'Leary, M.H. 1981. Carbon isotope fractionation in plants. Phytochemistry, 20: 553-567.

- Palmer, A.N. 2011. Distinction between epigenic and hypogenic 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.
- Rodriguez-Estrella, T. 2015. Hidrogeología. En: *Sima de la Higuera. Monumento Nacional*. Ed: Ayuntamiento de Pliego. pp. 35-49.
- Ros, A, Llamusí, J. y Inglés, S. 1988. Sima Destapada, Hornos, Isla Plana (Cartagena). *Revista Caliza*, 0: 4-12.
- Ros, A., Llamusí, J.L y Sánchez, J. 2011. Exploración en Sima Destapada y Cueva del Agua, dos cavidades de origen hidrotermal (Murcia), *VIII Simposio Europeo de Espeleología*, Marbella. 481-517.
- Ros, A., Llamusí, J.L. y Sánchez, J. 2014. Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia (España). En: *Iberoamérica Subterránea*. Ed: J.M. Calaforra y J.J. Durán). Asociación Española de Cuevas Turística. 405-416.
- Ros, A., Llamusí J.L. y Sánchez, J. 2014. *Cuevas hipogénicas en la Región de Murcia (España),* vol. I. Ed: CENM-naturaleza, Murcia. 25 pp.
- Tremaine, D.M., Froelich, P.N. y Wang, Y. 2011. Speleothem calcite farmed in situ: Modern calibration of δ^{18} O and δ^{13} C paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 4929-4950.