

ROSA BLANCA GONZÁLEZ-GUTIÉRREZ\*  <https://orcid.org/0000-0002-6863-8495>

JAVIER SANTOS-GONZÁLEZ\*  <https://orcid.org/0000-0002-5567-653X>

JAVIER CRUZ-DE JUAN\*\*

JOSÉ ANTONIO GUERRERO-FERNÁNDEZ\*\*

MÍCHEL MENDOZA\*\*

MARCOS VILARIÑO\*\*

SERGIO ESTRADA\*\*

ADRIÁN MELÓN-NAVA\*  <https://orcid.org/0000-0002-4796-7214>

AMELIA GÓMEZ-VILLAR\*  <https://orcid.org/0000-0002-0061-8017>

JOSÉ MARÍA REDONDO-VEGA\*  <https://orcid.org/0000-0002-4631-2216>

\* Departamento de Geografía y Geología, Universidad de León. \*\* Grupo Espeleológico Matallana

## *Caracteres ambientales y espeleotemas de pequeño tamaño en la cavidad de Torca Marino (Parque Nacional de los Picos de Europa, León, España)*

### RESUMEN

En este artículo se presentan los datos de temperatura y humedad obtenidos entre 2018 y 2020 a diferentes profundidades (entrada, -350 m, -450 m y -680 m) en la cavidad de Torca Marino (Parque Nacional de los Picos de Europa, León) que, con un desnivel de -943 m, es una de las de mayor desarrollo vertical del mundo. Los datos muestran una temperatura interior de 4,6 °C a -350 m, entre 4,7 y 5,1 °C a -450 m y de 4,8 °C a -680 m, con un ambiente siempre saturado y condiciones homotérmicas, aunque con pequeñas fluctuaciones de hasta 0,4 °C en el sector de la Gran Mulata, con un gradiente de temperatura muy bajo (0,06 °C cada 100 m) entre las distintas profundidades. Estos valores son muy semejantes a la temperatura media en la cota de entrada a la cueva, estimada en 4,9 °C. El paso de los espeleólogos también tuvo repercusión en las temperaturas registradas, que ascendieron hasta 0,5 °C para volver a sus valores normales. El ambiente saturado ha favorecido el desarrollo de espeleotemas, aunque concentrados únicamente en las galerías horizontales, separadas por grandes conductos verticales. Helictitas, *frostworks*, *coralloids*, microchimeneas de hadas, pisolitas y agregados columnares son los principales espeleotemas de pequeño tamaño localizados en el interior de la cavidad, destacando su notable desarrollo y, sobre todo, su excelente estado de conservación. En el caso de las microchimeneas de hadas, no se han encontrado citas previas en el interior de cavidades.

### RÉSUMÉ

*Caractéristiques environnementales et petits spéléothèmes de la grotte de Torca Marino (Parc National des Picos de Europa, León, Espagne).* – Cet article présente les données de température et d'humidité obtenues entre 2018 et 2020 à différentes profondeurs (entrée, -350 m, -450 m et -680 m) dans la grotte de Torca Marino (Parc National des Picos de Europa, León), qui est l'une

des grottes les plus profondes du monde (-943 m). Les données montrent une température intérieure de 4,6 °C à -350 m, entre 4,7 et 5,1 °C à -450 m et 4,8 °C à -680 m, avec un environnement toujours saturé et des conditions homothermiques, bien qu'avec de petites fluctuations allant jusqu'à 0,4 °C dans le secteur de Gran Mulata, avec un très faible gradient de température (0,06 °C tous les 100 m) entre les différentes profondeurs. Ces valeurs sont très proches de la température moyenne à l'entrée de la grotte, estimée à 4,9 °C. Le passage des spéléologues a également eu un impact sur les températures enregistrées, qui ont augmenté de 0,5 °C pour revenir à leurs valeurs normales. L'environnement saturé a favorisé le développement de spéléothèmes, bien que concentrés uniquement dans les galeries horizontales, séparées par de grands conduits verticaux. Les hélicites, les *frostworks*, les coralloïdes, les micro cheminées de fées, les pisolithes et les agrégats colonnaires sont les principaux petits spéléothèmes situés à l'intérieur de la cavité. Leur développement est remarquable ainsi que, surtout, leur excellent état de conservation. Dans le cas des cheminées de micro-fées, aucune donnée antérieure n'a été trouvée à l'intérieur des cavités.

### ABSTRACT

*Environmental characteristics and small speleothems in the Torca Marino cavity (Picos de Europa National Park, León, Spain).* – In this study, temperature and humidity data obtained between 2018 and 2020 at different depths (entrance, -350 m, -450 m and -680 m) in the Torca Marino cavity (Picos de Europa National Park, León) are presented. This cave is one of the deepest in the world, with a total depth of -943 m. The data show an interior temperature of 4.6 °C at -350 m, between 4.7 and 5.1 °C at -450 m and 4.8 °C at -680 m, with an always saturated environment and homothermal conditions, although with small fluctuations of up to 0.4 °C in the Gran Mulata sector, with a very low tempera-

ture gradient (0.06 °C every 100 m) between the different depths. These values are similar to temperature at the altitude of the cave entrance, estimated at 4,9 °C. The passage of the cavers also had an impact on the temperatures recorded, which rose by 0.5 °C to return to their normal values. Saturated conditions have favoured the development of speleothems, which occur only in horizontal galleries, that are separated by vertical conduits. Helictites, frostworks, collaroids, micro-hoodoos, cave pearls and parallel-columnar aggregates are the main speleothems, which are relevant due to their

notable development and excellent degree of preservation. In the case of micro-faerie chimneys, any previous citations have been found in the interior of the cavities.

#### PALABRAS CLAVE/MOTS CLÉ/KEYWORDS

Karst, cuevas, espeleotemas, régimen térmico, Picos de Europa.  
Karst, grottes, spéléothèmes, régime thermique, Picos de Europa.  
Karst, caves, speleothems, thermal regime, Picos de Europa.

## I. INTRODUCCIÓN

La cavidad de Torca Marino se localiza en el Macizo Central de Picos de Europa, situado en el Parque Nacional homónimo. Ha sido explorada por el Grupo Espeleológico Matallana (GEM, 2017) durante los últimos veinte años. La exploración —aún sin concluir— ha alcanzado un desnivel de -943 m respecto a la entrada de la sima. La especial configuración morfoestructural de este sector montañoso de la Cordillera Cantábrica ha favorecido la karstificación, siendo frecuentes cavidades subterráneas de gran tamaño, sobre todo las que tienen un desarrollo vertical. Así, en los Picos de Europa se encuentran 50 cavidades de las 375 que figuran en la relación de las grandes cavidades mundiales (Gulden, 2022) en las que Torca Marino ocupa el puesto 138 de la lista. En su génesis, además de factores estructurales (se localizan casi siempre en cadenas alpinas de latitudes medias), influyen los grandes espesores de rocas calcáreas, los fuertes desniveles entre la superficie del karst y las surgencias kársticas, y unos rasgos climáticos fríos y húmedos de alta montaña que potencian la disolución de la caliza (Rossi, 2004; Robledo Ardila et al., 2016), si los comparamos con otros ambientes mediterráneos de la Península Ibérica.

En esta cavidad el desarrollo vertical es muy notable, estando formada por un conjunto de pozos sucesivos conectados por galerías, hasta alcanzar el nivel freático. Los numerosos conductos verticales limitan los procesos de precipitación química y la génesis de los espeleotemas, que se concentran en las galerías. A pesar de ello, en esta cavidad se desarrollan espeleotemas muy singulares, como las helictitas, que no son muy frecuentes y cuya presencia merece ser resaltada.

La importancia que tiene el Macizo Central de Picos de Europa no se corresponde con el escaso papel que, hasta el momento, ha despertado entre los investigadores la espeleogénesis de sus sistemas subterráneos, a pesar de ser un Parque Nacional, Reserva de la Biosfera, Zona de Especial Conservación y de encontrarse entre los contextos geológicos de relevancia internacional definidos en la Ley 42/2007 de Patrimonio Natural y Biodiversidad de España. Entre los estudios geomorfológicos referidos al endokarst se encuentran descripciones muy generales (Rossi, 2004), interesantes aportaciones sobre las cuevas heladas (Gómez Lende et al., 2014; 2016; Gómez Lende y Serrano, 2021) y datos enfocados a su carácter patrimonial (González Trueba, 2007; González-Trueba y Serrano Cañadas, 2008; Gómez Lende y Serrano Cañadas, 2012; Fernández-Martínez et al., 2010; Ballesteros et al., 2013b). Además, los estudios del endokarst existentes (e.j. Ruiz Fernández y Poblete Piedrabuena, 2012; Ballesteros et al., 2015; 2017a; 2017c), las propuestas metodológicas (Ballesteros et al., 2011; 2014; 2015; 2017b) y su evaluación como patrimonio subterráneo (Ballesteros et al., 2013a; 2014; 2019) se han centrado más, hasta el momento, en el Macizo Occidental de Picos de Europa, con algunas excepciones que comprenden el conjunto de los Picos de Europa (p. ej. Ballesteros et al., 2019; Fernández-Gibert et al., 2000), o se ocupan del Macizo Oriental (Smart, 1984). Sin embargo, el estudio de los espeleotemas existentes en ellas y el análisis del régimen térmico y la humedad apenas ha recibido atención desde el ámbito científico, salvo alguna excepción (Pérez-López et al., 2016).

Este trabajo pretende:

- Conocer las condiciones ambientales de la sima de Torca Marino, una de las grandes



FIG.1. Localización de Torca Marino en la Península Ibérica y los Picos de Europa (arriba a la izquierda), en el Macizo Central (abajo) y en detalle (arriba a la derecha). Elaboración propia a partir de la base cartográfica disponible en el centro de descargas del CNIG (<https://centrodedescargas.cnig.es/>).

cavidades de Picos de Europa, con un importante desarrollo vertical que permite obtener registros térmicos y de humedad a profundidades pocas veces estudiadas previamente.

- Caracterizar los espeleotemas de pequeño tamaño presentes en la misma, algunos muy singulares. La verticalidad de la cavidad y la variedad de espeleotemas incrementa el valor patrimonial de unas cavidades que son conocidas en el mundo entero, desde el punto de

vista de la espeleología deportiva, por sus sobresalientes condiciones naturales.

## II. ÁREA DE ESTUDIO

Los Picos de Europa se sitúan en el extremo norte de la Península Ibérica y constan de tres macizos en los que se encuentran las cumbres más elevadas de la Cordillera Cantábrica. La entrada de la cavi-

dad está a 1960 m en una posición intermedia en el cordal de dirección ONO-ESE, en el que se sitúa el Tiro del Cura de 1853 m y la Torre del Medio de 2054 m, y que separa la canal del Moeño al N del valle del arroyo Mermejo al S, en el Macizo Central de los Picos de Europa (Fig. 1).

El relieve actual del macizo se ha generado gracias a la combinación de procesos glacio-fluvio-kársticos guiados por las morfoestructuras y la fracturación local (Smart, 1986). Los valles afluentes muy inclinados, las denominadas canales, se adaptan a la estructura geológica siguiendo en la zona la dirección ONO-ESE (González Trueba, 2007).

- i) Por un lado, la proximidad del mar Cantábrico a las cumbres más elevadas de la Cordillera Cantábrica ha creado un elevado potencial morfogénético que se traduce en la profunda disección realizada por la red fluvial, que ha atravesado las compactas calizas de los Picos de Europa, retranqueando la divisoria cantábrica hacia el S (Cabero Diéguez et al., 1988). Por eso la divisoria cantábrica no coincide, como ocurre en otras zonas de la cordillera, con las cotas más elevadas del macizo. El encajonamiento de los ríos en el macizo da lugar a unos desniveles muy grandes (entre la cabecera del arroyo Mermejo y su confluencia en el río Cares hay un desnivel de 2000 m en apenas 3,5 km, con pendientes de más del 50%).

Los Picos de Europa presentan tal masividad debido tanto al espesor de las calizas, su disposición vertical, como al apilamiento de estas en escamas cabalgantes que aumentan su espesor real unos 1450 m. Esta configuración litoestructural y el fuerte levantamiento tectónico del conjunto dan lugar a un macizo de más de 2000 m en vertical de calizas. Además, los Picos de Europa constituyen un bloque montañoso de 18 km de anchura de N a S, con un desnivel superior a los 2400 m respecto al corredor septentrional y de 1700 m respecto a la depresión meridional de Valdón (Cabero Diéguez et al., 1988).

- ii) Por otro lado, la disposición de las estructuras cabalgantes de Picos de Europa y la existen-

cia de unidades de baja permeabilidad intercaladas entre las calizas ha compartimentado el macizo desde un punto de vista hidrogeológico (Ballesteros et al., 2017c), lo que, junto a los procesos erosivos, ha creado un relieve muy abrupto. Las crestas y los escarpes de caliza se disponen verticales hasta el fondo de las gargantas fluviales, o dominan vertientes muy inclinadas y crean un entramado estructural toscamente ortogonal. Además, al tratarse de un macizo calcáreo, los procesos kársticos siempre han estado presentes, tanto superficialmente como en el desarrollo de las redes de conductos subterráneos.

Durante los periodos fríos pleistocenos, la ocupación por el hielo de los relieves preexistentes de carácter fluvio-kárstico dio lugar al ahondado y ensanchamiento de las cabeceras fluvio-torrenciales de los valles afluentes de los ríos principales, como el Cares (Ruiz-Fernández et al., 2022). Por eso son claras las huellas erosivas del paso del hielo glaciar en los dos valles que confinan el cordal calcáreo en el que se localiza Torca Marino, sobre todo en la vertiente septentrional, así como los restos morrénicos situados cerca de la confluencia con el valle principal del río Cares. Los procesos paraglaciar han retocado y suavizado las formas glaciares previas, terminando de esculpir el aspecto actual de este relieve de origen mixto y complejo (González Trueba, 2007).

### III. MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo de campo consistió en la exploración y cartografía de Torca Marino, que comenzó con el descubrimiento por azar de la entrada de la cavidad en el año 2001 (GEM, 2017). Posteriormente se han llevado a cabo por parte de algunos de los autores campañas anuales sin interrupción desde el año 2003 hasta la actualidad. El trabajo de exploración se hace generalmente al final del período estival, con objeto de favorecer las operaciones dentro de la cavidad y para acceder con mayor facilidad a la entrada de la cueva.

La exploración requirió la utilización de técnicas alpinas de descenso de simas debido a la existencia de varios grandes pozos. Así, se instalaron cuerdas mediante tacos autoperforantes en la pared, poniendo anclajes metálicos roscados y mosquetones donde anudar las cuerdas. Estos seguros sujetan la cuerda al tiempo que evitan cualquier tipo de roce que pueda romperla. Fue necesario salvar grandes desniveles verticales (Fig. 2), ocasionalmente en completo volado, hasta llegar al fondo de los pozos y proseguir la exploración en profundidad. Por otro lado, la dimensión de muchos de los pozos explorados requirió la instalación de campamentos a  $-405$  m de profundidad en el interior de la cavidad en una posición casi intermedia de la misma.

Para realizar una topografía detallada de la cavidad, se tomaron datos con clinómetros y brújulas calibradas y cinta métrica indeformable. También se usó topofil para medir los desniveles en grandes pozos; más recientemente se usó un distanciómetro Leica Disto X3 de gran versatilidad. El tratamiento de los datos obtenidos mediante el software Visual-Topo para representación y cálculo de topografías espeleológicas, permitió que los planos obtenidos, con la compensación de errores en cierres de poligonales añadidos, tengan una precisión BCRA 5.

Con objeto de conocer las condiciones ambientales de Torca Marino, durante la campaña de 2018 se instalaron en la cavidad cuatro registradores para los parámetros básicos: la temperatura del aire y la humedad. Los registradores se ubicaron a distintas profundidades: el más superficial a unos 100 m de la entrada de la cavidad; el segundo a  $-350$  m de profundidad en la Sala del Cincuentenario; el tercero a  $-450$  m en la galería de La Gran Mulata, y el más profundo, a  $-680$  m, en la denominada Repisa del Datalogger.

Estos sensores han registrado la temperatura y humedad en distintos niveles de la cavidad para determinar el régimen diario y estacional a lo largo del año, así como los cambios o diferencias apreciables según la profundidad a la que se hacían los registros (Fig. 2). El material utilizado consistió en cuatro registradores de temperatura y humedad relativa (*datalogger*) marca HOBO Pro V2, modelos U23 001A y *external* 002A. Los registradores se

programaron para la toma de datos continua cada hora durante un periodo de dos años, entre el 27 de agosto de 2018 y el 22 agosto de 2020, si bien el sensor situado a  $-450$  m (galería Gran Mulata) solamente estuvo en funcionamiento el primer año, y el más profundo (Repisa del Datalogger) no lo hizo el último mes del periodo de observación. Durante la campaña de verano de 2020 se extrajeron de la cavidad y se volcaron los datos para su tratamiento e interpretación.

Dado que no se pudieron tomar datos continuos a la entrada de la cueva, se utilizaron datos de 8 estaciones meteorológicas próximas del entorno del Parque Nacional de Picos de Europa, con el fin de compararlas con los registros de la cueva. Los datos provienen de la Red de Seguimiento de Cambio Global, que pone a disposición el Organismo Autónomo Parques Nacionales (dependiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico). Las estaciones (Fig. 1) están situadas a diferentes rangos altitudinales del Parque Nacional (Cabaña Verónica, 2239 m; Mirador del Cable, 1919 m; Vega de Urriellu, 1907 m, Coriscao, 1751 m; Vega de Ario, 1649 m; Pico Cotorra, 1505 m; Sotres, 1257 m; Cordiñanes, 672 m) y aportan datos de temperatura a intervalos de 10 minutos desde 2008, que fueron tratados con RStudio. Se calcularon las temperaturas medias anuales desde 2008 hasta 2018, por ser el periodo más completo de registros. A partir de los valores medios, y mediante análisis de regresión simple, se obtuvieron las rectas de ajuste anuales. Reemplazando en las fórmulas de las rectas el valor de la altitud de entrada de la cueva (1957 m) se obtuvo el valor de temperatura estimada para la altitud de la entrada de la cueva.

#### IV. RESULTADOS

Hasta el momento se han explorado y cartografiado 48 pozos, 4 de ellos con más de 100 m de profundidad (Fig. 2), con un desnivel total para toda la sima de  $-943$  m (GEM, 2017). Los pozos se disponen escalonadamente enlazados por conductos inclinados y rampas con tendencia a desarrollarse

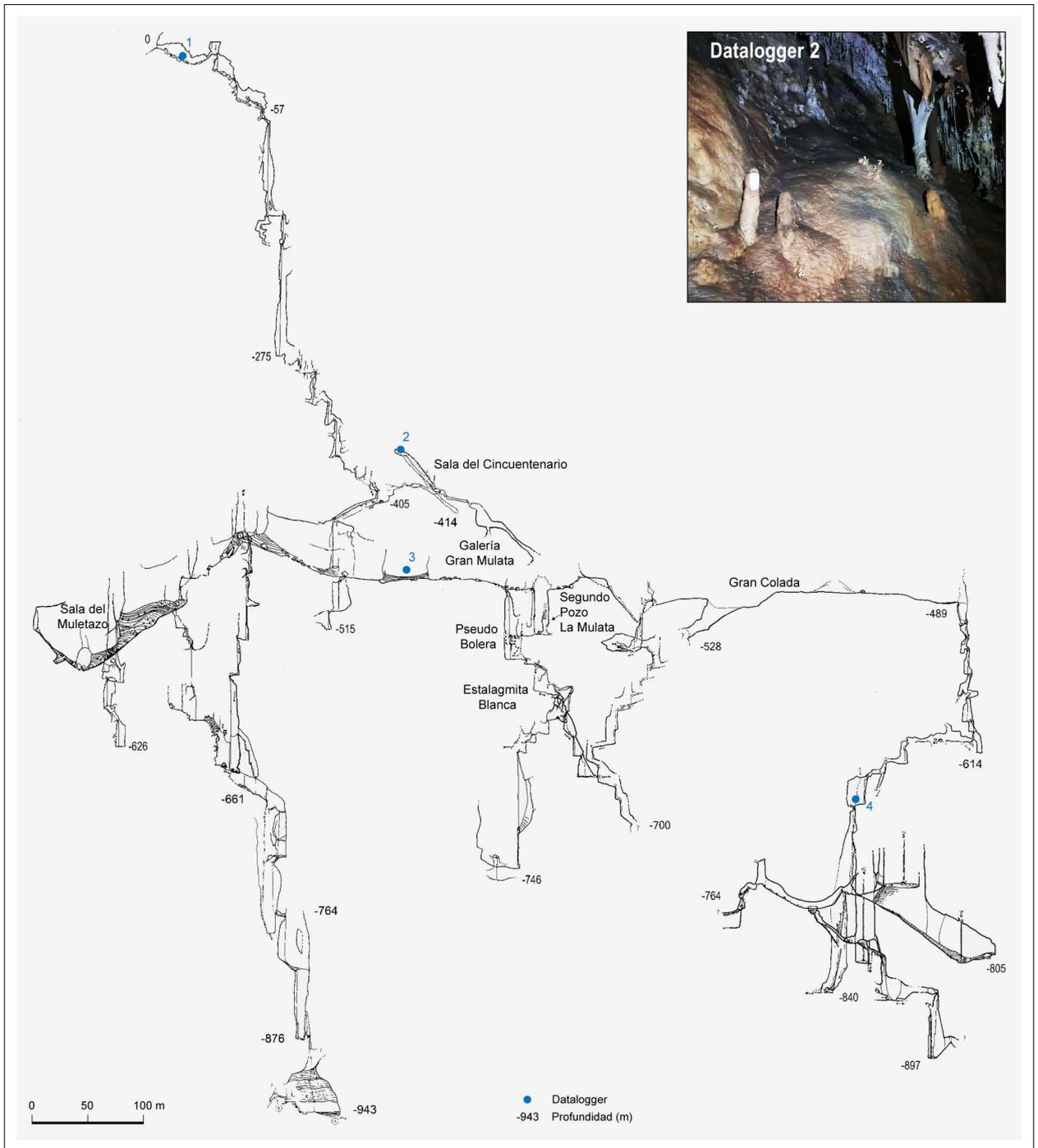


FIG. 2. Topografía de los sectores de Torca Marino explorados hasta el momento, y localización de los registradores de temperatura (*datalogger*) instalados. Fuente: Grupo Espeleológico Matallana (GEM).

en dirección N. Hay un sector intermedio en torno a  $-500$  m donde se localizan dos grandes galerías (Gran Colada y Gran Mulata). Hasta el momento

la cavidad tiene explorados en torno a los 4000 m de conductos subterráneos con una pendiente media del 23,5%.

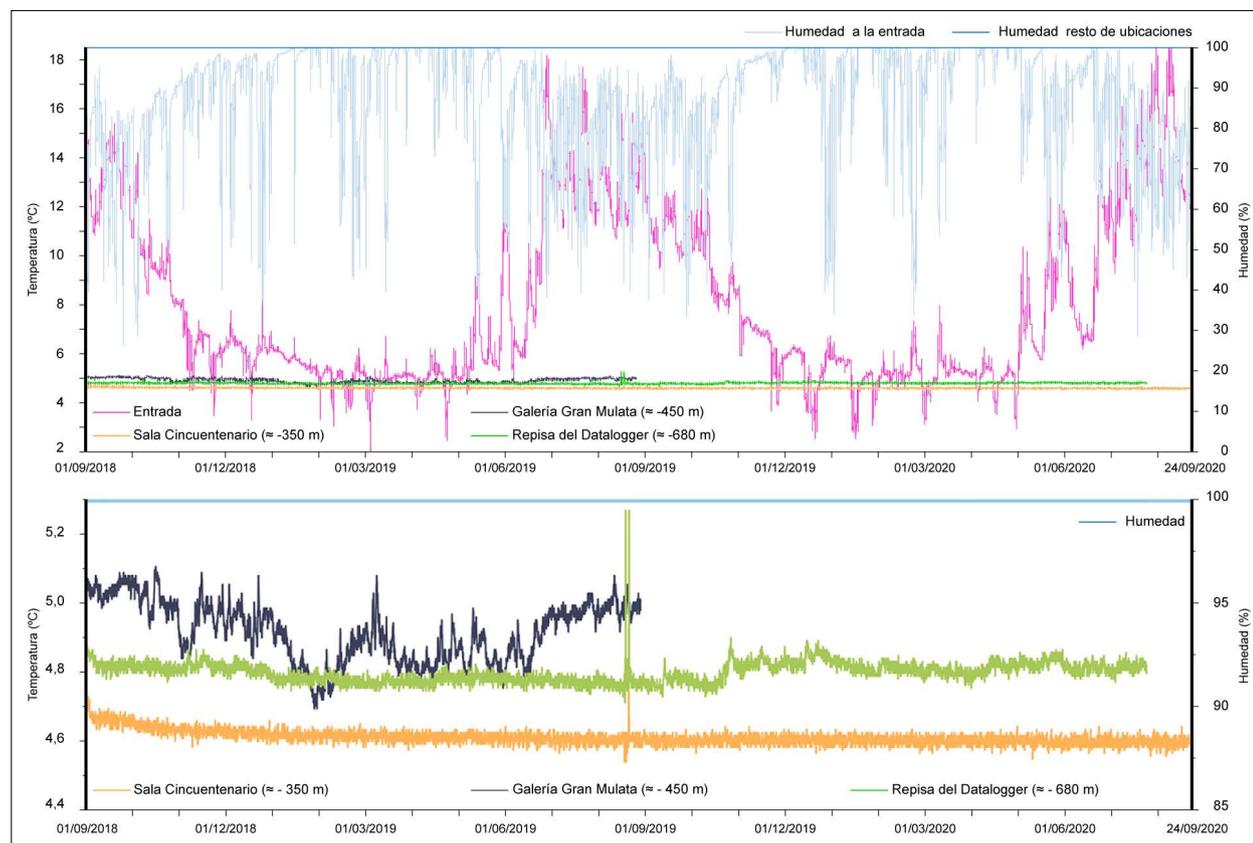


FIG. 3. Representación gráfica de los datos de temperatura y humedad del aire de Torca Marino, en el periodo de 01/09/2018 a 24/09/2020. En la imagen inferior se muestra el detalle de las condiciones en el interior de la cueva modificando las magnitudes de los ejes verticales para hacer visibles las mínimas oscilaciones térmicas registradas en las diferentes localizaciones. Elaboración propia a partir de los datos de los registradores.

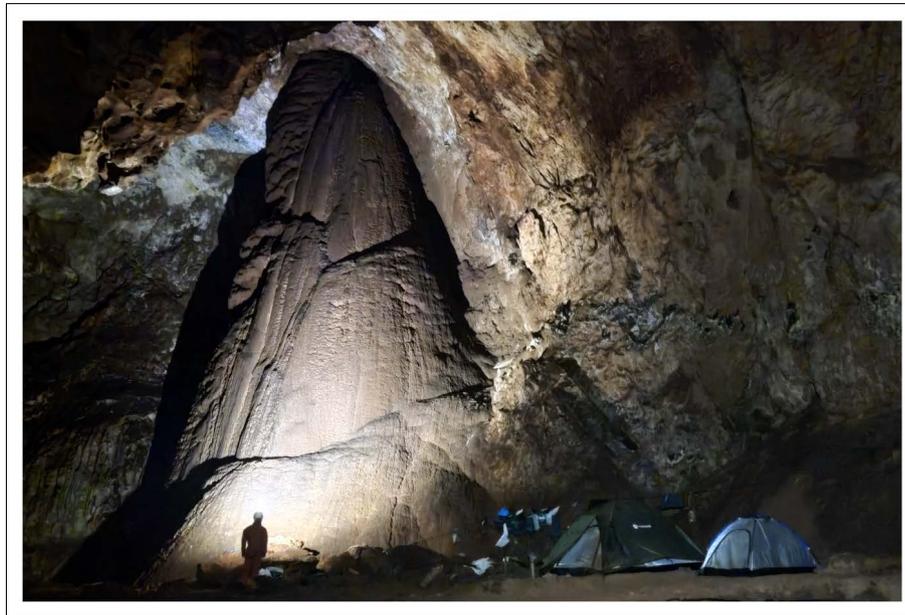
#### 4.1. LOS DATOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DE LA CAVIDAD

La temperatura media de la zona en la que se encierra la cavidad, estimada a partir de los datos de las estaciones meteorológicas próximas, es de 4,9 °C (con una desviación estándar de 0,7 °C) durante el periodo 2018-2020. Los datos registrados en el interior de la cavidad muestran unas temperaturas similares a ese valor y muy regulares a lo largo del año, comprendidas entre 4,6 y 4,9 °C, para el periodo de observación de 24 meses. Aunque las temperaturas se mostraron muy estables, se encuentran pequeñas diferencias (Fig. 3). Así, en la Sala del Cincuentenario (−350 m) la oscilación térmica es casi nula, manteniéndose en torno a 4,6 °C durante todo el periodo (con pequeñas oscilaciones en torno a la resolución

del sensor) salvo un repunte hasta 4,9 °C coincidente con el paso de los espeleólogos. En la Galería Gran Mulata (−450 m), durante el año de funcionamiento del sensor, la temperatura presentó una pequeña oscilación térmica, variando entre 4,7 y 5,1 °C. En la Repisa del Datalogger (−680 m), la temperatura se mantuvo en torno a los 4,8 °C, pero con pequeñas oscilaciones puntuales entre 4,7 y 4,9 °C, ascendiendo a 5,2 °C tras el paso de los espeleólogos (Fig. 3). La diferencia de temperatura entre los −350 m y los −680 es de solo 0,2 °C, lo que nos da un gradiente de profundidad de 0,06 °C/100 m e indica una elevada estabilidad que caracteriza a las zonas homotérmicas de las cavidades (Luetscher y Jennin, 2004).

Las temperaturas registradas por el cuarto *datalogger*, situado cerca de la entrada de la cavidad, muestran cambios estacionales (Fig. 3) con un rit-

FIG. 4. Colada de grandes dimensiones en la Galería de la Gran Colada, a  $-500$  m de profundidad. Fotografía de los autores.



mo de ascenso desde el mes de abril hasta el verano (con un valor máximo de  $19,0$  °C), y un descenso a lo largo del otoño con los valores más bajos durante el invierno (mínima de  $2,0$  °C en el periodo de observación). La temperatura media ha sido de  $8,2$  °C, sensiblemente superior a la estimada en la entrada a la cueva. Por lo tanto, en el *datalogger* de la entrada sí se produce una notable oscilación térmica ( $17$  °C en el periodo de observación), al contrario de los situados en las zonas profundas de la cavidad donde la temperatura se mantiene prácticamente estable a lo largo del año.

En cuanto a la humedad relativa registrada, los tres *datalogger* situados a distintas profundidades muestran una curva plana, pues los valores registrados son siempre, e invariablemente, del 100% de humedad (Fig. 3). El situado cerca de la entrada, por el contrario, muestra constantes cambios a lo largo del periodo de observación, aunque se observa una cierta relación con los datos observados de temperatura. Así los periodos de menores valores de humedad coinciden con aquellos en que la temperatura media aumenta (de junio a septiembre), mientras que los de valores más elevados de humedad (aun con oscilaciones puntuales marcadas) coinciden con los datos más bajos de temperaturas medias (de noviembre a mayo).

#### 4.2. LA RIQUEZA Y DIVERSIDAD DE LOS ESPELEOTEMAS DE TORCA MARINO

A pesar de los numerosos conductos verticales, en los que los procesos erosivos son dominantes y la formación de espeleotemas está muy ralentizada o es inexistente, en el tramo intermedio de la cavidad, donde predominan los conductos horizontales (Sala del Cincuentenario, Gran Mulata, Gran Colada, Fig. 2), sí es notorio el proceso de reconstrucción litoquímica y como resultado hay una profusión de espeleotemas. Estos se encuentran en buen estado de conservación, lo cual constituye un patrimonio sobresaliente del Parque Nacional hasta ahora desconocido. Se destacan aquí los espeleotemas de pequeño tamaño más notables, en muchas ocasiones desarrollados sobre otras formas mayores, como estalagmitas, estalactitas cónicas, columnas, pilares, coladas o cortinas, que también aparecen en la cavidad (Fig. 4).

##### A) *Helictitas*

Las helictitas son espeleotemas generalmente de escala centimétrica (Frisia et al., 2002; Davis, 2019), aunque en algunas ocasiones excepcionales pueden alcanzar varios metros de longitud

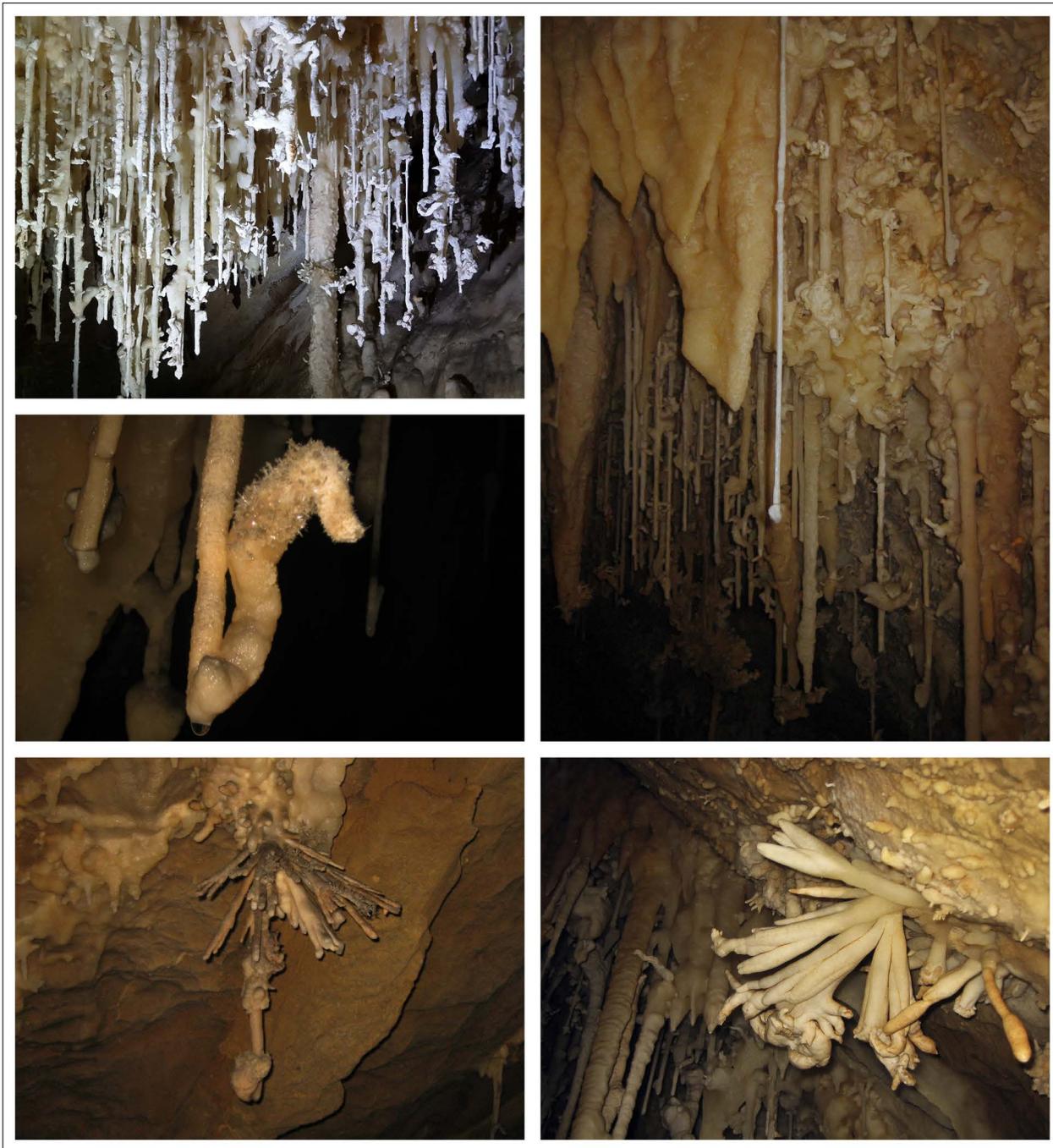


FIG. 5. Helictitas: en las imágenes superior y central izquierda, en masa enredada (*tangled masses*, Hill y Forty, 1995) en la Sala del Cincuentenario; a la derecha de las anteriores, invertida (*upturned helictites*, Rowling, 2000); por último, en las imágenes inferiores, de varillas (*rod helictites*, Rowling, 2000) con disposición radial en la Sala del Cincuentenario. Fotografías de los autores.

(Rowling, 2000). Llama la atención su disposición en cualquier dirección y se cree que se forman cuando la presión hidrostática fuerza a la solución a salir de un poro o una grieta, aunque son muchos y

variados los factores que intervienen en su génesis (Rowling, 2000). Constituidas por calcita, forman estructuras cilíndricas largas y retorcidas, con un capilar central estrecho de aproximadamente 0,20-

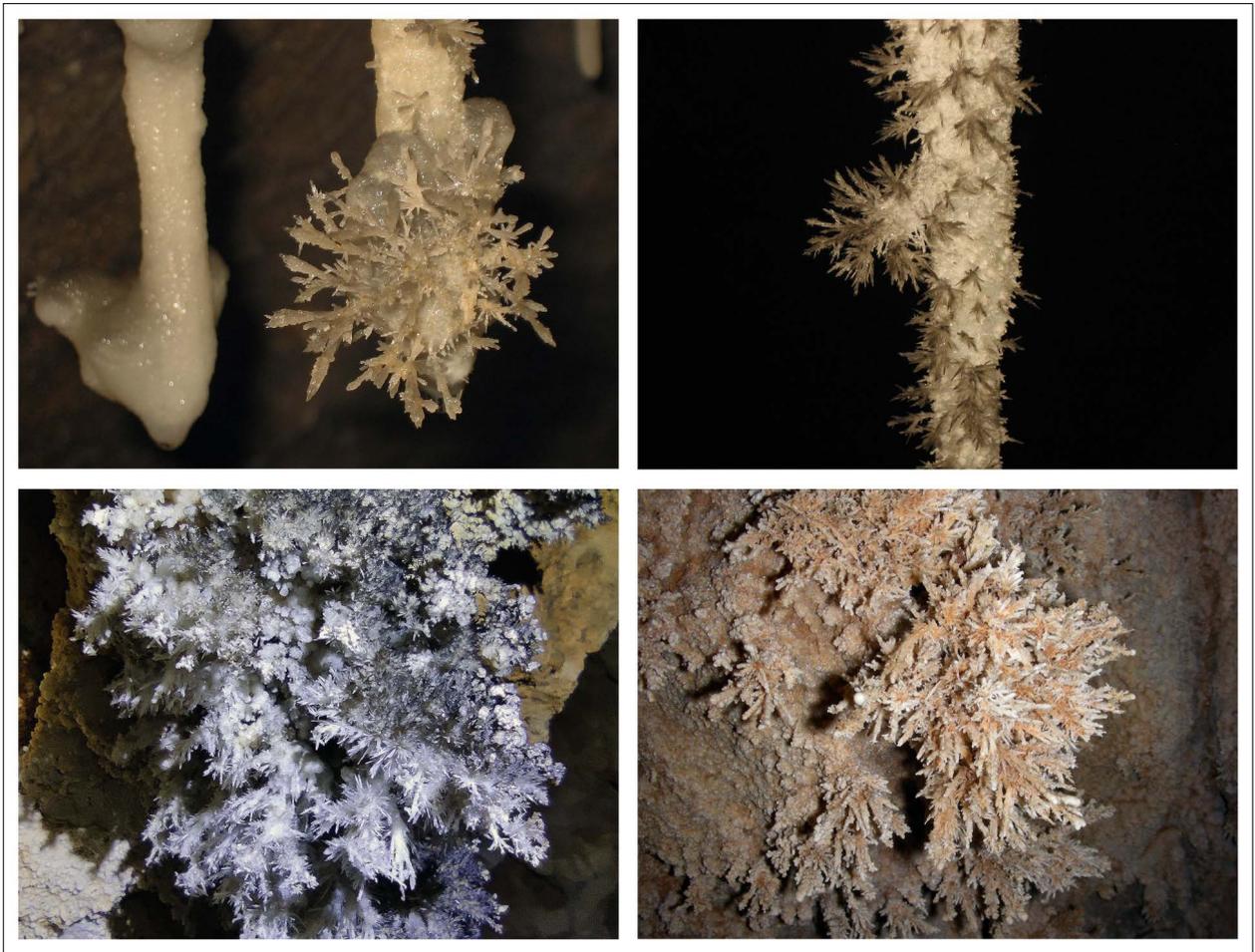


FIG.6. *Frostworks*: en la Sala del Cincuentenario, sobre helictitas (arriba a la izquierda) y sobre una estalactita tubular (arriba a la derecha); en la Sala del Muletazo (abajo a la izquierda); con localización parietal, en el Segundo Pozo de La Mulata (abajo a la derecha). Fotografías de los autores.

0,35 mm de diámetro; los microcanales laterales, “canículos”, dan como resultado una estructura algo porosa (Rowling, 2000).

La helictita tipo tiene simetría radial (crecimiento de cristales radiales en torno al canal central), aunque el canal puede ser recto o presentar ramificaciones. El nombre del espeleotema, que proviene etimológicamente del griego *helicos* debido a su forma externa en espiral (Hill y Forti, 1995), ramificada y curvada, indica que pueden crecer en cualquier dirección.

Frecuentemente, una helictita comienza a partir de otras formaciones como estalactitas (Fig. 5, sup. izq.), o macarrones (*soda straw*), a veces hasta desarrollar una verdadera maraña (Fig. 5, centro

izq.). Se forma cuando gotas de agua individuales depositan carbonato de calcio alrededor del borde. Las gotas no caen como en la formación de estalactitas, sino que se evaporan en su lugar. Se cree que la dirección de crecimiento está determinada por la orientación fortuita de los ejes de cristal de la calcita transportada en el agua.

Los intentos de clasificación de las helictitas hasta el momento no han resultado eficaces. Algunos autores hablan de dos grandes subtipos en función del medio en el que se generan (subaéreo y subacuático) y 4 variedades básicas de las que salen, a su vez, otras 17 (Hill y Forti, 1995). Rowling (2000) describió solo 10 formas diferenciadas morfológicamente (sierra, varilla —Fig. 5, inferiores—, mano,

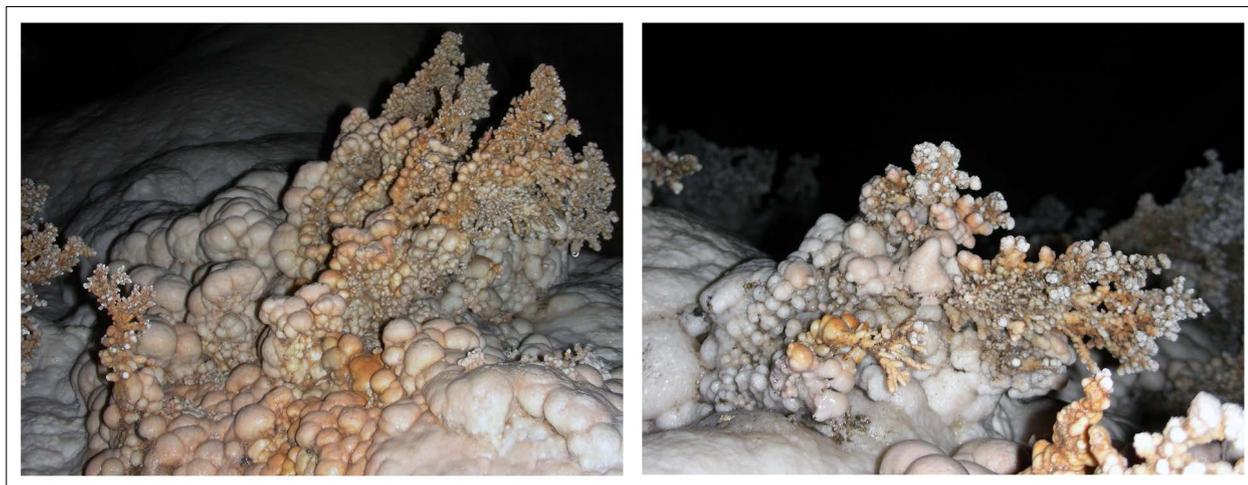


FIG. 7. Formaciones coraloides en el sector de Estalagmita Blanca: a la izquierda, sobre colada de botroides; a la derecha, con precipitados hidrosolubles en los ápices. Fotografías de los autores.

mariposa, cinta, invertida —Fig. 5, sup. dcha.—, pero añadió 10 grupos de factores (gravitacionales, crecimiento de los cristales, sistema cristalino, ambientales, biológicos, canal central...) que influyen en la génesis y desarrollo de estos espeleotemas, con lo que las combinaciones son tan numerosas que resulta verdaderamente difícil definir y clasificar las helictitas.

Esos grupos de factores no siempre se cumplen, o no con el mismo carácter e intensidad, y eso basta para explicar por qué se generan en determinados enclaves, aparentemente de manera caprichosa, y en otros no. En Torca Marino se localizan preferentemente en la Sala del Cincuentenario (Fig. 5, inferiores), pero también aparecen en otros sectores, como el de Estalagmita Blanca. Las morfologías más habituales son radiales en varilla, enredadas e invertidas.

### B) *Frostworks*

Con el nombre de *frostwork* se designa a un espeleotema constituido por agrupaciones de cristales de carbonato de calcio consistente en aerosoles de cristal, radiales y aciculares, que se asemejan a un cactus o planta de cardo. Están formados habitualmente de aragonito, aunque también es frecuente la precipitación de calcita en la parte proximal y de aragonito en la distal (Castaño de Luis et al., 2010). Su origen es controvertido, aunque son habituales

en conductos y galerías con un flujo de aire superior a la media donde la evaporación jugaría un papel en su formación. Es bastante común que los *frostwork* crezcan sobre otros espeleotemas ya desarrollados como los *soda straw*, formaciones coraloides, botroides y helictitas.

En un principio, los *frostworks* se agrupaban junto con las *anthodites*, dado el aspecto parecido que presentan ambos espeleotemas, pero ya hace tiempo que se tiende a separarlos reservándose el término *anthodite* para los agregados en los que los cristales presentan un canal central y usándose el término *frostwork* cuando no existe dicho canal interior (Davis, 2019; De Waele y Gutiérrez, 2022; Hill y Forti, 1995). Además, es frecuente la precipitación de carbonatos hidrosolubles en el ápice de los cristales de aragonito tales como hidromagnesita y la monohidrocalcita (Self y Hill, 2003). Los agregados aciculares tienen su origen en el flujo superficial de agua por las paredes de las cavidades o de otros espeleotemas preexistentes; para que se desarrolle un *frostwork*, el flujo de agua debe ser lento y debe tener un alto contenido en magnesio, hecho que favorece la precipitación de aragonito en condiciones estables.

En Torca Marino los *frostwork* son relativamente abundantes en determinados enclaves como la Sala del Cincuentenario, el Segundo Pozo de La Mula o la Sala del Muletazo. Allí se localizan en mu-

chas superficies de otros espeleotemas que ejercen la función de soporte (sobre helictitas (Fig. 6, sup. izq.), sobre estalactitas tubulares pendiendo de las bóvedas (Fig. 6, sup. dcha.), sobre botroides (Fig. 6, inf. izq.), o con una localización parietal (Fig. 6, inf. dcha.).

### C) Formaciones coraloides

Las formaciones coraloides (*coralloids*) son espeleotemas formados por concreciones de forma nodular o globular, agrupados y arracimados; su morfología, con complejas ramificaciones, asemeja a los corales marinos, de ahí su nombre. Su tamaño y composición son diversos, lo mismo que su localización dentro de la cavidad, pues se ubican tanto en el suelo (Fig. 7, izq.) como en las paredes de la cueva, o sobre la superficie de otros espeleotemas ya formados, como las estalactitas, encontrándose en ese caso más cerca de la bóveda de la cavidad. En general, cuando su génesis se realiza en condiciones subaéreas tienden a ser pequeños y nudosos, mientras que, si se generan en el seno del agua, suelen ser de mayor tamaño y con un contorno más uniforme (Hill y Forti, 1995; Castaño de Luis et al., 2010).

Su estructura en capas concéntricas de carbonato de calcio se desarrolla alrededor de alguna irregularidad o discontinuidad de esas superficies mencionadas y a partir de películas muy delgadas de agua. El agua que aporta el carbonato de calcio para originar la concreción puede tener diversos orígenes, como filtraciones desde el macizo kárstico, por la presencia de flujos laminares, procesos de capilaridad, de condensación (Fig. 7, dcha.), o proceder de las salpicaduras.

En Torca Marino son frecuentes en algún enclave donde recubren abundantemente tanto estalactitas como frágiles tapizados en la superficie de clastos que, procedentes de derrumbamientos, se acumulan en algunos suelos de salas y galerías, habiéndose observado en todas las salas de mayor tamaño.

### D) Microchimeneas de hadas

Las rocas sedimentarias que presentan en su seno contrastes de dureza y resistencia frente a la erosión

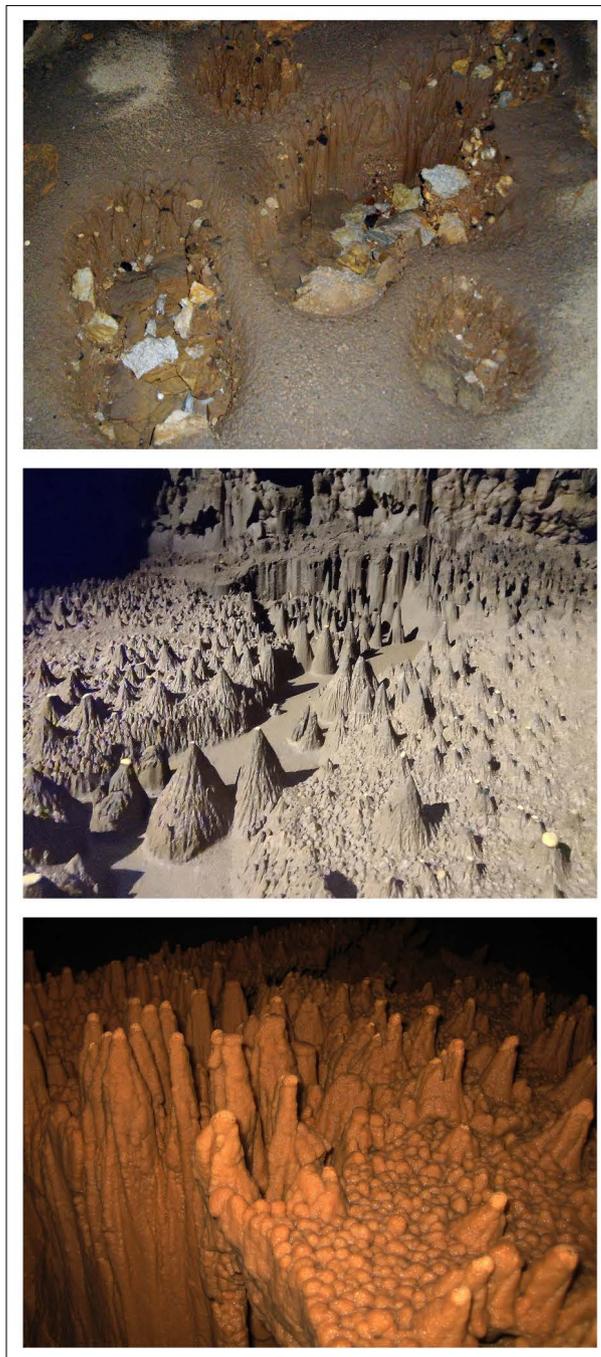


FIG. 8. Diferentes estadios del desarrollo de microchimeneas de hadas en la zona tras la Mulata: arriba, formación de pequeños pináculos embrionarios protegidos por fragmentos de roca; en el centro, la incisión de las aguas al escurrir sobre la formación de arcillas va dejando exentas un conjunto de microchimeneas de hadas; abajo, debido a la adición de carbonato de calcio precipitado, transformación de las microchimeneas de hadas en espeleotemas, en cuyo interior se encuentran los antiguos pináculos de arcilla. Fotografías de los autores.

de las aguas corrientes, suelen dar lugar a relieves exentos en los que una capa, o un fragmento de roca resistente, preservan de la erosión al material más blando situado debajo. Factores que ayudan a su aparición son la presencia de rocas blandas, las fuertes pendientes y la escasez de vegetación, que favorecen la incisión de los materiales blandos por el agua y su desalojo. El resultado es una forma de relieve piramidal, o bien estrechos pináculos, casi columnas a veces, cuya cúspide la forma un bloque más resistente.

Reciben diversos nombres (*cheminées de fées*, *demoiselles coiffées*, *hoodoos*, *fairy chimney*) y han sido descritas en numerosos países y diversos ambientes climáticos. Es el caso de formaciones sedimentarias de origen glaciario o fluvio-glaciario con abundante matriz fina que incluyen grandes bloques de cuarcita o de rocas cristalinas. Si bien es probable que aparezcan en otras cuevas (por ejemplo, Gruber et al., 2022, Fig. 23), que nosotros sepamos, hasta ahora no se habían descrito estas formaciones en el interior de las cavidades subterráneas. Estas formaciones endokársticas reproducen a pequeña escala las denominadas “chimeneas de hadas”, aunque con estas presentan similitudes y diferencias.

Después de eventos de precipitación de alta intensidad, la escorrentía laminar tiende a concentrarse rodeando las gravas y pequeños cantos de roca resistentes presentes en los sedimentos finos, excavando estas y generando chimeneas de hadas. Del mismo modo goteos intensos y persistentes en el interior de la cavidad, si golpean sobre sedimentos poco consolidados, pueden desencadenar efectos semejantes (Fig. 8, superior). Y si la intensidad del proceso es suficiente y el espesor del sedimento también, se pueden generar pequeñas chimeneas de hadas en forma de pináculos (Fig. 8, centro). Son de dimensiones modestas, hasta 60 cm, formadas por arcillas y muchos tienen en la parte superior una grava o canto rodado que protegen el pináculo de la erosión. Se han observado principalmente en el Pozo Pseudo-Bolera.

Son formas de alta fragilidad y efímeras de no ser por la adición de una capa de carbonato de calcio sobre su superficie, que les da una consistencia



FIG. 9. Pisolitas en el sector Estalagmita Blanca. Fotografías de los autores.

y resistencia a la erosión que los pináculos de arcilla en principio no tenían. Esta transformación, de formas erosivas en verdaderos espeleotemas (Fig. 8, inferior), es la fase de su desarrollo que las diferencia claramente de las chimeneas de hadas que se forman fuera de las cavernas bajo condiciones subaéreas.

#### E) Pisolitas

También denominadas perlas de las cavernas (*cave pearls*), son espeleotemas localizados en los suelos de las galerías y salas subterráneas (Fig. 9). Son concreciones de carbonato de calcio que se generan en pequeñas charcas poco profundas (Castaño de Luis et al., 2010), o en *gours* cuando el goteo constante desde la bóveda golpea la superficie del agua (Hill y Forti, 1995). Los cristales se disponen de forma radial en forma de capas en torno a un punto central o núcleo constituido por un fragmento de roca o cristal preexistente de naturaleza calcárea (y más raramente por material alóctono no carbonatado).

Su forma suele ser redondeada y esférica, aunque en ocasiones pueden ser más alargadas e incluso con una sección cúbica si el estadio es más embrionario. El tamaño es variable, aunque las de forma más perfecta de esfera tienen un diámetro en torno a 1 cm o algo inferior, apareciendo principalmente en el sector Estalactita Blanca (Fig. 9).



FIG. 10. Agregados columnares paralelos de carbonato de calcio en el Segundo Pozo de La Mulata. Los sucesivos episodios de cristalización apilados aparecen separados por discontinuidades que indican la interrupción del proceso. Fotografías de los autores.

#### F) *Agregados columnares paralelos*

Los cristales rara vez se generan de manera individual, sino que suelen crecer multiplicados sobre una superficie o sustrato como agregados minerales. La interacción de unos cristales con los otros que tiene próximos afecta y limita directamente el crecimiento de cada cristal. De tal forma que los agregados son mucho más que simples grupos de cristales de la misma composición mineral que crecen juntos (Self y Hill, 2003).

La mayoría de los espeleotemas son agregados minerales, si bien solo son visibles caras cristalográficas en sus terminaciones finales. Durante ese crecimiento grupal, hay competencia entre los cristales que constituyen el agregado, de tal modo que unos cristales alcanzan mayor desarrollo que otros, aunque en general cada episodio de cristalización aparece netamente diferenciado.

Los prismas se disponen de forma paralela a modo de “empalizada”, a veces entrecruzada, otras veces dispuestos de forma radial como nervios de hojas (Fig. 10, izquierda) cuando unos cristales han progresado más en una determinada dirección. La cristalización del carbonato tiene lugar en sucesivos episodios, con lo que los agregados se apilan unos encima de otros con una discontinuidad neta entre ellos (Fig. 10, derecha). En ocasiones, pueden aparecer marcas, o niveles más oscuros, que indican

una paralización del proceso de cristalización del carbonato (Self y Hill, 2003). En algunos niveles los extremos de los cristales presentan precipitados hidrosolubles al igual que ocurría en ocasiones con los *frostworks* y los *coralloids*. Estas formas han sido observadas en el Segundo Pozo Gran Mulata, a unos -500 m de profundidad.

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. EL PAPEL AMORTIGUADOR DE LA PROFUNDIDAD EN LAS TEMPERATURAS Y LA HUMEDAD

El análisis de las temperaturas obtenidas en el interior de la cueva nos muestra algunos aspectos de interés. En primer lugar, la temperatura media del interior de la cueva (entre 4,6 y 4,9 °C) y la estimada para la altitud de la entrada de la cueva (4,9 °C) son muy similares. Este hecho ha sido señalado previamente en trabajos sobre temperaturas de cuevas (Davies, 1960; Moore, 1964; Moore y Nicholas, 1964; Domínguez-Villar et al., 2013; Mammola et al., 2019), y es debido a que el aire penetra en las cuevas desde el exterior y se transfiere por conducción a través de la cueva (Domínguez-Villar et al., 2013) en función del desequilibrio térmico con el exterior (Freitas et al., 1982), tendiendo a alcanzar una temperatura constante por el aumento de la hu-

medad relativa y el equilibrio con la temperatura de la roca (Wigley y Brown, 1971; 1976). De hecho, Domínguez-Villar y otros (2013) señalaron que los cambios en la cubierta vegetal del entorno de la entrada de la cueva pueden afectar a la temperatura de la misma, lo que tiene implicaciones en el desarrollo de los espeleotemas.

Más llamativo es el hecho de que la diferencia de temperatura entre los  $-350$  m y los  $-680$  es de solo  $0,2$  °C, lo que nos da un gradiente de profundidad de  $0,06$  °C/100 m, que es un valor mucho menor de los que se han planteado para cuevas europeas en climas de latitudes medias y que oscilan entre  $0,61$  °C y  $0,52$  °C cada 100 m en las zonas heterotérmicas y de  $0,33$  °C a  $0,21$  °C en las zonas vadosas (Luetscher y Jeannin, 2004). También es inferior a los  $0,2$  °C/100 m observado en cuevas frías próximas de Picos de Europa por (Pérez-López et al., 2016). En todos estos sectores de Torca Marino, el aire está saturado de humedad, como se corresponde con un medio con ausencia de ventilación (Luetscher et al., 2008), sin que se hayan observado variaciones de humedad. Esa escasa ventilación (probablemente determinada por la morfología de la cavidad) también podría influir en una mayor estabilidad térmica y menor gradiente de temperatura respecto a otras cavidades de las que se disponen datos ambientales, si bien no pueden descartarse otros factores, como la entrada de agua fría en el sistema endokárstico.

Respecto a la temperatura en profundidad, los tres emplazamientos seleccionados muestran unas condiciones homotérmicas, con variaciones mínimas de temperatura durante todo el periodo analizado. Estas variaciones solo tienen cierta importancia en el caso de la Galería Gran Mulata, en la que hubo una oscilación térmica de  $0,4$  °C, con frecuentes cambios de  $0,1$ - $0,2$  °C, que pueden indicar corrientes de aire más importantes que en el resto de los emplazamientos analizados. Respecto al registrador más profundo (Repisa del Datalogger,  $-680$  m de profundidad), vemos que en la segunda quincena de agosto de 2019 experimenta dos subidas de temperatura de  $0,5$  °C, que rompen la tendencia plana de toda la serie de observación de 23 meses (Fig. 3). Esas fechas coinciden con el paso por ese punto de los espeleólogos en su campaña anual de explora-

ción. Es conocido que la presencia humana altera las condiciones ambientales de una cavidad (Calaforra et al., 2003; Sebela y Turk, 2013), aunque en cuevas de menores dimensiones y más ventiladas se ha observado que la temperatura se recupera tras visitas turísticas (Domínguez-Villar et al., 2010). Las condiciones constantes de temperatura en el interior de la cavidad son muy sensibles a los cambios introducidos desde el exterior. Basta la presencia de espeleólogos para desencadenar alteraciones sensibles en su temperatura como los registrados, lo que prueba la fragilidad del medio subterráneo y la influencia que las actividades humanas pueden tener en ellos.

El único emplazamiento que muestra condiciones heterotérmicas es la entrada a la cueva. En este lugar se han registrado temperaturas de entre  $19$  °C y  $2$  °C, con una marcada oscilación térmica que está relacionada con las temperaturas del exterior de la cueva. Esta relación entre el interior y el exterior nos indica que se trata de una zona altamente ventilada (Mammola et al., 2019), en la que se da una convección forzada debido a la diferencia de temperatura entre el interior y exterior de la cueva, lo que impulsa el intercambio de calor entre ambos ambientes y explica las oscilaciones térmicas en la entrada de las cuevas (Luetscher et al., 2008).

## 5.2. ESPELEOGÉNESIS Y FORMACIÓN DE ESPELEOTEMAS

La génesis de espeleotemas está controlada no solo por la distribución, cantidad y química del agua que se filtra a través del acuífero kárstico —las cuales están muy influenciadas por los caracteres bioclimáticos y del relieve—, sino también por las condiciones microclimáticas de la cueva (presencia de corrientes de aire que dependen también de la geometría de los conductos) (Cruz et al., 2015; Dreybrodt, 2019). Por eso, estos se desarrollan, preferentemente, en aquellos tramos formados por conductos horizontales, galerías, en las que es posible el suficiente “reposo ambiental” para que se desarrollen los fenómenos de reconstrucción litoquímica. La forma de los pasajes de la cueva influye en

el crecimiento y en la distribución de espeleotemas, siendo las galerías horizontales o subhorizontales la forma óptima para la acumulación de espeleotemas (Fairchild et al., 2007; De Waele y Gutiérrez, 2022).

En los conductos verticales, por el contrario, la circulación rápida del agua erosiona y disuelve la roca con relativa facilidad siguiendo las líneas de debilidad del macizo calcáreo, por lo que los procesos de precipitación solo tienen un carácter embrionario (en alguna fisura parietal, o en los bordes de los pozos), mientras que muchos procesos que requieren la persistencia del agua en contacto con la roca apenas tienen espacio en el que desarrollarse. Por eso, casi siempre, en las paredes de los pozos de Torca Marino suele aflorar la roca del sustrato sin recubrir por formaciones fruto de la precipitación química.

Por otro lado, sabemos que hay una relación entre las aguas subterráneas y las superficiales y que la morfogénesis manifestada por el encajonamiento de una red fluvial influye en la profundización, y en la extensión, de las redes subterráneas y así se ha constatado en algunos sistemas de Picos de Europa (Ballesteros et al., 2014; 2015).

En la espeleogénesis, además de la influencia en la incisión del relieve por los principales colectores fluviales, el río Cares en nuestro caso, también contribuye la disposición de las estructuras geológicas (Ballesteros et al., 2015; 2017c); por un lado el apilamiento de sucesivos cabalgamientos ha multiplicado la potencia inicial de las capas de calizas (Cabero Diéguez et al., 1988); por otro, la disposición subvertical y su inclinación al N favorecen la abundancia de conductos verticales y una tendencia al desarrollo de las cavidades en esa dirección. Además, las capas de calizas también se disponen verticalmente (Ballesteros et al., 2017c), lo que ha influido en el desarrollo de la espeleogénesis en ese mismo sentido, siendo más abundantes de lo habitual los conductos y cavidades verticales.

Así parece ocurrir con Torca Marino, pues, aunque el sector intermedio de la cavidad alberga las dos grandes galerías de la cavidad (Gran Colada y Gran Mulata, Fig. 2), son el casi medio centenar de simas verticales (4 de más de 100 m de profundidad) las que la singularizan y sus conexiones me-

diantes rampas y conductos inclinados le confieren su complejidad.

La Sala del Cincuentenario, con su morfología aislada, más angosta y confinada en relación al resto de la cavidad, crearía unas condiciones ambientales más proclives al desarrollo de los espeleotemas, como ocurre cuando pasos estrechos confinan galerías más amplias (Fairchild et al., 2007). Así, los dos pasos angostos que compartimentan esta galería (GEM, 2017) podrían explicar la profusión de formaciones excéntricas que existen debido a las especiales condiciones de presión del aire allí estancado.

## VI. CONCLUSIONES

Los registros térmicos en Torca Marino entre agosto de 2018 y agosto de 2020 muestran unas condiciones heterotérmicas en la entrada de la cueva y homotérmicas en el interior, con un ambiente siempre saturado en agua. La temperatura media fue durante este periodo de 4,6 °C a -350 m, entre 4,7 °C y 5,1 °C a -450 m y de 4,8 °C a -680 m. La temperatura estimada para la cota de la entrada de la cueva es de 4,9 °C, muy semejante a la del interior, lo que muestra la influencia que las entradas de aire desde el exterior tienen en las cuevas. Esta temperatura asciende ligeramente en profundidad, pero con un gradiente muy bajo (0,06 °C cada 100 m), inferior al observado previamente en otras cuevas. Las condiciones homotérmicas del interior se vieron alteradas en hasta 0,5 °C por el paso de los espeleólogos, lo que muestra la fragilidad de estos entornos y su sensibilidad a influencias externas.

Por otro lado, las condiciones de humedad, constantemente en el 100%, nos indican unas condiciones muy favorables para el desarrollo de todos los procesos espeleogénicos. Así, están presentes tanto aquellos que, como la disolución de la caliza, precisan de un íntimo y persistente contacto del agua con la roca, como los que implican la formación de precipitados de carbonato de calcio.

El importante desarrollo de más de 4 km y el desnivel de -943 m de Torca Marino, así como la gran frecuencia de conductos verticales, se deben a las especiales condiciones morfoestructurales del macizo

calcáreo en el que se localiza: grandes espesores de caliza, fracturación del macizo que favorece la penetración del agua y fuertes desniveles del relieve. Sin embargo, algunos enclaves de la cueva presentan un proceso activo de reconstrucción litoquímica como muestran los espeleotemas desarrollados de manera preferente en las galerías horizontales.

Se han descrito algunos de los principales espeleotemas de pequeña dimensión encontrados hasta el momento en Torca Marino: helictitas, *frostworks*, *coralloids*, microchimeneas de hadas (no citadas previamente en el interior de cavidades), pisolitas y agregados columnares. Esta riqueza de espeleotemas, que presentan un excelente estado de conservación gracias a las dificultades de acceso a la cavidad, supone un incremento de su valor patrimonial añadido al ya de por sí conocido desde el punto de vista deportivo como una de las simas de mayor profundidad del Parque Nacional de los Picos de Europa.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto LE080G19 (Significado paleo-ambiental y relación con el cambio global de los glaciares rocosos de la Cordillera Cantábrica: datación relativa y análisis de la estructura interna mediante tomografía eléctrica), financiado por la Junta de Castilla y León.

Adrián Melón-Nava cuenta con una ayuda del programa FPU del Ministerio de Universidades de España (FPU20/01220).

A todo el Grupo Espeleológico Matallana. Muchos de sus miembros han participado en el reconocimiento de la cavidad y los espeleotemas que contiene.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Ballesteros, D., Fernández-Martínez, E., Carcavilla, L. y Jiménez-Sánchez, M. (2019). Karst Cave Geoheritage in Protected Areas: Characterisation and Proposals of Management of Deep Caves in the Picos de Europa National Park (Spain). *Geoheritage*, 11, 1919-1939. <https://doi.org/10.1007/s12371-019-00416-8>
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Domínguez-Cuesta, M. J., García-Sanseguno, J. y Meléndez, M. (2013a). El Global Geosite SK004 Picos de Europa (España). Caracterización de los sistemas kársticos y catálogo de formas para su evaluación como patrimonio geomorfológico. En J. M. Mata-Perelló (ed.), *El patrimonio geológico y minero como motor del desarrollo local* (pp. 33-52). XIV Congreso sobre Patrimonio Geológico y Minero. Castrillón (Asturias). Libro de Actas del Congreso. [https://www.researchgate.net/publication/282076406\\_El\\_Global\\_Geosite\\_SK004\\_Picos\\_de\\_Europa\\_Espana\\_Caracterizacion\\_de\\_los\\_sistemas\\_karsticos\\_y\\_catologo\\_de\\_formas\\_para\\_su\\_evaluacion\\_como\\_Patrimonio\\_Geomorfologico](https://www.researchgate.net/publication/282076406_El_Global_Geosite_SK004_Picos_de_Europa_Espana_Caracterizacion_de_los_sistemas_karsticos_y_catologo_de_formas_para_su_evaluacion_como_Patrimonio_Geomorfologico)
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M. y García-Sanseguno, J. (2013b). Patrimonio geológico en espacios naturales protegidos: caracterización geomorfológica preliminar de sistemas kársticos profundos en el Parque Nacional de los Picos de Europa (España). *Cuadernos del Museo Geominero*, 15, 361-370.
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., García-Sanseguno, J. y Borreguero, M. (2014). SpeleoDisc: A 3-D quantitative approach to define the structural control of endokarst. An application to deep cave systems from the Picos de Europa, Spain. *Geomorphology*, 216, 141-156. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.039>
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., García-Sanseguno, J. y Giral, S. (2011). Geological methods applied to speleogenetical research in vertical caves: the example of Torca Teyera shaft (Picos de Europa, northern Spain). *Carbonates Evaporites*, 26, 29-40. <https://doi.org/10.1007/s13146-011-0052-7>
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., García-Sanseguno, J., Giral, S. y Meléndez-Asensio, M. (2017a). Propuesta de un nuevo modelo espeleogenético para los Picos de Europa (Cordillera Cantábrica, España). *Geogaceta*, 62, 55-58. [https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo62/geo62\\_14.pdf](https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo62/geo62_14.pdf)
- Ballesteros, D., Jiménez-Sánchez, M., Giral, M., DeFelipe, I. y García-Sanseguno, J. (2017b). Glacial origin for cave rhythmite during MIS 5d-c in a glaciokarst landscape, Picos de Europa (Spain). *Geomorphology*, 286, 68-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.014>

- Ballesteros, D., Malard, A., Jeannin, P. Y., Jiménez-Sánchez, M., García-Sanseguendo, J., Meléndez-Asensio, M. y Sendra, G. (2015). KARSYS hydrogeological 3D modeling of alpine karst aquifers developed in geologically complex areas: Picos de Europa National Park (Spain). *Environmental Earth Sciences*, 74(12), 7699-7714. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4712-0>
- Ballesteros, D., Meléndez-Asensio, M., Garcia-Sanseguendo, J. y Jiménez-Sánchez, M. (2017c). Factores geológicos condicionantes del desarrollo y profundidad de las cuevas de los Picos de Europa (Norte de España). *Boletín SEDECK*, 11, 4-11. <https://www.researchgate.net/publication/321730992>
- Cabero Diéguez, V., Martínez de Pisón Stampa, E. y Redondo Vega, J. M. (1988). Picos de Europa (Valdeón y Sajambre). En V. Cabero Diéguez y L. López Trigal (coords.), *La provincia de León y sus comarcas* (pp. 201-216). Diario de León. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=579984>
- Calaforra, J. M., Fernández-Cortés, A., Sánchez-Martos, J., Gisbert, J. y Pulido-Bosch, A. (2003). Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use. *Environmental Conservation*, 30(2), 160-167. <https://doi.org/10.1017/S0376892903000146>
- Castaño de Luis, R., Redondo Vega, J. M., y Fernández Martínez, E. (2010). La cueva de Valdelajo (Sahelices de Sabero, León): una pequeña joya geológica en una comarca minera. En P. Florido e I. Rábano (eds.), *Una visión multidisciplinar del patrimonio geológico y minero, Cuadernos del Museo Geominero*, 12, 47-61. <https://buleria.unileon.es/handle/10612/10083>
- Cruz, J. A., Turrero, M. J., Cáceres, J. O., Marín-Roldán, A., Ortega, A. I., Garralón, A., Sánchez, L., Gómez, P., Muñoz-García, M. B., Edwards, R. L. y Martín-Chivelet, J. (2015). Long-term hydrological changes in northern Iberia (4.9-0.9 ky BP) from speleothem Mg/Ca ratios and cave monitoring (Ojo Guareña Karst Complex, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 74, 7741-7753. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4687-x>
- Davies, W. E. (1960). Meteorological Observations in Martens Cave, West Virginia. *Bulletin of the National Speleological Society*, 22(1), 92-100. <https://legacy.caves.org/pub/journal/NSS%20Bulletin/Vol%2022%20part%202.pdf>
- Davis, D. G. (2019). Chapter 61. Helictites and related speleothems. En W. B. White, D. C. Culver y T. Pipan (eds.), *Encyclopedia of Caves* (3.<sup>a</sup> ed., pp. 514-520). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814124-3.00061-3>
- De Waele, J. y Gutiérrez, F. (2022). *Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves*. John Wiley y Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119605379>
- Domínguez-Villar, D., Carrasco, R. M., Pedraza, J., Fairchild, I. J. y Baker, A. (2010). Efecto en la temperatura de las visitas turísticas en la Cueva del Águila, Ávila. Valoración de la viabilidad de la cueva para el estudio térmico de su dinámica natural. *Geogaceta*, 49, 43-46. <https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo49/art11.pdf>
- Domínguez-Villar, D., Fairchild, I. J., Baker, A., Carrasco, R. M. y Pedraza, J. (2013). Reconstruction of cave air temperature based on surface atmosphere temperature and vegetation changes: Implications for speleothem palaeoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, 369-370, 155-168. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.03.017>
- Dreybrodt, W. (2019). Chapter 116, Speleothem deposition. En W. B. White, D. C. Culver y T. Pipan (eds.), *Encyclopedia of Caves* (3.<sup>a</sup> ed., pp. 996-1005). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814124-3.00116-3>
- Fairchild, I. J., Frisia, S., Borsato, A. y Tooth, A. (2007). Speleothems. En D. J. Nash y S. J. McLaren (eds.), *Geochemical Sediments and Landscapes* (pp. 200-245). Oxford: Blackwell.
- Fernández-Gibert, E., Calaforra, J. M. y Rossi, C. (2000). Speleogenesis in the Picos de Europa Massif, Northern Spain. En A. Klimchouk, D. Ford, A. Palmer y W. Dreybrodt (eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers* (pp. 352-357). Huntsville: National Speleological Society. [https://www.researchgate.net/publication/220044229\\_Speleogenesis\\_Evolution\\_of\\_Karst\\_Aquifers](https://www.researchgate.net/publication/220044229_Speleogenesis_Evolution_of_Karst_Aquifers)
- Fernández-Martínez, E., Fuertes Gutiérrez, I., Alonso Herrero, E., Redondo Vega, J. M. Cortizo Álvarez, J., Gómez Villar, A., Santos González, J., Herrero Hernández, A. y González Gutiérrez, R. B. (2010). *Lugares de Interés Geológico, León*. LIG núm. 3, Vega

- de Liordes, Fundación Patrimonio Natural, Junta de Castilla y León.
- Freitas, C. R., Littlbjohn, R. N., Clarkson, T. S. y Kristament, I. S. (1982). Cave climate: Assessment of airflow and ventilation. *International Journal of Climatology*, 2(4), 383-397. <https://doi.org/10.1002/joc.3370020408>
- Frisia, S., Borsato, A., Fairchild, I. J., McDermott, F. y Selmo, E. M. (2002). Aragonite-Calcite Relationships in Speleothems (Grotte De Clamouse, France): Environment, Fabrics, and Carbonate Geochemistry. *Journal of Sedimentary Research*, 72(5), 687-699. <http://dx.doi.org/10.1306/020702720687>
- GEM (2017). La Torca Marino (TC-4): a 943 m de profundidad en los Picos de Europa. *Boletín SEDECK*, 11, 51-57. <https://drive.google.com/file/d/1uCW4brbsM-jXwAxbpuGq6e6PtaYsxxgWO/view>
- Gómez Lende, M., Berenguer, F. y Serrano, E. (2014). Morphology, ice types and thermal regime in a high mountain ice cave. First studies applying terrestrial laser scanner in the Peña Castil ice cave (Picos de Europa, northern Spain). *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria*, 37(2), 141-150. [https://www.glaciologia.it/wp-content/uploads/FullText/full\\_text\\_37\\_2/06\\_GFDQ\\_37\\_2\\_Gomez\\_141\\_150.pdf](https://www.glaciologia.it/wp-content/uploads/FullText/full_text_37_2/06_GFDQ_37_2_Gomez_141_150.pdf)
- Gómez Lende, M. y Serrano Cañadas, E. (2012). Elementos del patrimonio geomorfológico subterráneo: las cuevas heladas de Picos de Europa (Cordillera Cantábrica). En A. González Díez (coord.), *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012* (Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología, pp. 47-50), Santander. <https://info.igme.es/ielig/documentacion/ca/ca046/documentos/d-ca046-03.pdf>
- Gómez Lende, M. y Serrano Cañadas, E. (2021). Cave mountain permafrost environments in the Picos de Europa and their implications. *Cuaternario y Geomorfología*, 35(3-4), 55-76. <https://doi.org/10.17735/cyg.v35i3-4.89377>
- Gómez Lende, M., Serrano, E., Jordá Bordehore, L. y Sandoval, S. (2016). The role of GPR techniques in determining ice cave properties: Peña Castil ice cave, Picos de Europa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 2177-2190. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/esp.3976>
- González Trueba, J. J. (2007). *Geomorfología del Macizo Central del Parque Nacional Picos de Europa* (234 pp.). Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid. <https://info.igme.es/ielig/documentacion/ca/ca121/documentos/d-ca121-02.pdf>
- González Trueba, J. J. y Serrano Cañadas, E. (2008). La valoración del patrimonio geomorfológico en espacios naturales protegidos. Su aplicación al Parque Nacional de Picos de Europa. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 47, 175-194. <https://bage.geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/2035>
- Gruber, P., Szunyogh, G. y Telbisz, T. (2022). The Caves of Aggtelek Karst, Szalonna Karst and Rudabánya Mountains. En M. Veress y S. Leél-Össy (eds.), *Cave and Karst Systems of Hungary. Cave and Karst Systems of the World* (pp. 275-321). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92960-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92960-2_10)
- Gulden, B. (October 30, 2022). World's longest caves. *Geo2 Committee on Long and Deep Caves*. National Speleological Society (NSS).
- Hill, C. A. y Forti, P. (1995). The classification of cave minerals and speleothems. *International Journal of Speleology*, 24(1-4), 77-82. <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.24.1.5>
- Luetscher, M. y Jeannin, P. Y. (2004). Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. *Terra Nova*, 16(6), 344-350. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00572.x>
- Luetscher, M., Lismonde, B. y Jeannin, P. Y. (2008). Heat exchanges in the heterothermic zone of a karst system: Monlesi cave, Swiss Jura Mountains. *Journal of Geophysical Research*, 113(2), F02025. <https://doi.org/10.1029/2007JF000892>
- Mammola, S., Piano, E., Cardoso, P., Vernon, Ph., Domínguez-Villar, D., Culver, D. C., Pipan, T. y Isaia, M. (2019). Climate change going deep: The effects of global climatic alterations on cave ecosystems. *The Anthropocene Review*, 6(1-2), 98-116. <https://doi.org/10.1177/2053019619851594>
- Moore, G. W. (1964). Cave temperature. *National Speleological Society News*, 22, 57-60.
- Moore, G. W. y Nicholas, G. (1964). Out of phase seasonal temperature fluctuations in Cathedral Cave, Kentucky. *Geological Society of America Special Paper*, 76, 313.
- Morris Th. H., Ritter, S. M. y Laycock, D. P. (2012). *Geology unfolded. An illustrated guide to the Geology of Utah's National Parks*. Brigham Young University Press (Provo, UT).

- Pérez-López, R., Marcos-Nuez, A., Flores, C., Bañón, E., Álvarez, J., Escrivá, B. y Piera, F. (2016). Gradiente geotérmico vertical de grandes simas españolas: CS9-Jou Sin Terre (Cantabria), Cerro del Cuevón (Asturias), Sima de la Cornisa (Castilla y León), Sima GESM (Andalucía) y Sima de Benis (Murcia). *Actas EspeleoMeeting Ciudad de Villacarrillo* (pp. 21-27). [https://www.researchgate.net/publication/306239988\\_Vertical\\_geothermic\\_gradient\\_for\\_the\\_large\\_cave\\_systems\\_in\\_Spain\\_CS9-Jou\\_sin\\_Terre\\_Cantabria\\_Cerro\\_del\\_Cuevón\\_Asturies\\_Sima\\_de\\_la\\_Cornisa\\_Castilla\\_y\\_Leon\\_Sima\\_GESM\\_Andalusia\\_and\\_Sima\\_de\\_Benis\\_Murcia](https://www.researchgate.net/publication/306239988_Vertical_geothermic_gradient_for_the_large_cave_systems_in_Spain_CS9-Jou_sin_Terre_Cantabria_Cerro_del_Cuevón_Asturies_Sima_de_la_Cornisa_Castilla_y_Leon_Sima_GESM_Andalusia_and_Sima_de_Benis_Murcia)
- Robledo Ardila, P. A., Durán Valsero, J. J. y Pardo Iguzquiza, E. (2016). El karst en cifras ¿cuáles son las mayores cavidades del mundo y por qué? *Enseñanza de Ciencias de la Tierra*, 24(1), 28-34. <https://raco.cat/index.php/ECT/article/view/312533>
- Rossi, C. (2004). Picos de Europa, Spain. En J. Gunn (ed.), *Encyclopedia of Caves and Karst Science* (pp. 581-585). New York: Fiz. Dearn. <https://doi.org/10.4324/9780203483855>
- Rowling, J. (2000). *Cataloging Helictites and other capillary-controlled speleothems*. <http://www.speleonics.com.au/jills/pastpapers/helicat/>
- Ruiz-Fernández, J., García-Hernández, C. y Gallinar-Cañedo, D. (2022). The glaciers of the Picos de Europa. En M. Oliva, D. Palacios y J. M. Fernández-Fernández (eds.), *Iberia Land of Glaciers* (pp. 237-261). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00012-8>
- Ruiz Fernández, J. y Poblete Piedrabuena, M. A. (2012). Las simas del Macizo Occidental de los Picos de Europa: disposición estructural, depósitos asociados y características del drenaje. *Investigaciones Geográficas*, 57, 205-223. <https://doi.org/10.14198/IN-GEO2012.57.10>
- Sebela, S. y Turk, J. (2013). Natural and anthropogenic influences on the year-round temperature dynamics of air and water in Postojna show cave, Slovenia. *Tourism Management*, 40(2014), 233-243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tourman.2013.06.011>
- Self, C. A. y Hill, C. A. (2003). How speleothems grow: an introduction to the ontogeny of cave minerals. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(2), 130-151. <https://legacy.caves.org/pub/journal/PDF/V65/v65n2-Self.pdf>
- Smart, P. L. (1984). The geology, geomorphology and speleogenesis in the eastern massifs, Picos de Europa, Spain. *Cave Science*, 11, 238-245. <https://hinko.org/hinko/Downloads/BCRA/BCRA%2011-4-1984.pdf>
- Smart, P. L. (1986). Origin and development of glacio-karst closed depressions in the Picos de Europa, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 30(4), 423-243. <http://doi.org/10.1127/zfg/30/1987/423>
- Wigley, T. M. L. y Brown, M. C. (1971). Geophysical applications of heat and mass transfer in turbulent pipe flow. *Boundary-Layer Meteorology*, 1, 300-320. <https://doi.org/10.1007/BF02186034>
- Wigley, T. M. L. y Brown, M. C. (1976). The physics of caves. En T. D. Ford y C. H. D. Cullingford (eds.), *The Science of Speleology* (pp. 239-347). Londres: Academic Press.

Recibido: 24 de octubre de 2023

Revisado: 11 de diciembre de 2023

Aceptado: 21 de febrero de 2024