

DESCUBRIMIENTO DE ESPELEOTEMAS, SNOWBALLS Y FROSTWORKS DE YESO, ANHIDRITA, BASSANITA Y THENARDITA EN CAVIDADES DE SIERRA PERRA (SUR DE NAVARRA).

Finding of speleothems, snowballs and frostworks of gypsum, anhydrite, bassanite, thenardite in Sierra Perra caves (South Navarra).



Carlos GALÁN, Marian NIETO & Juliane FORSTNER.
Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

DESCUBRIMIENTO DE ESPELEOTEMAS, SNOWBALLS Y FROSTWORKS DE YESO, ANHIDRITA, BASSANITA Y THENARDITA EN CAVIDADES DE SIERRA PERRA (SUR DE NAVARRA).

Finding of speleothems, snowballs and frostworks of gypsum, anhydrite, bassanite, thenardite in Sierra Perra caves (South Navarra).

Carlos GALÁN, Marian NIETO & Juliane FORSTNER.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.

E-mail: cegalham@yahoo.es

Noviembre 2019.

RESUMEN

El trabajo describe la exploración y estudio de un conjunto de cuevas localizadas en la base y flancos de una meseta de yesos, situada al SW de Lerín (Navarra). Las cavidades se desarrollan en una unidad de evaporitas que ocupan el núcleo del Anticlinal de Falces, compuesto por yesos de edad Sueviense (Formación Falces, Oligoceno, Terciario continental). Los yesos aparecen en litofacies laminado-nodulares, de aspecto alabastrino, con intercalaciones de lutitas y niveles dolomíticos, con alto contenido salino. Las cuevas conforman un sistema y sus galerías subterráneas destacan por la gran cantidad y diversidad de espeleotemas. Estas forman recubrimientos aciculares, frostworks, snowballs, excéntricas y grandes cristales curvos de yeso. Algunas de ellas presentan tonalidades rosáceas y anaranjadas. Hay también curiosas estalactitas de un color negro brillante intenso en superficie (con aspecto de breca o asfalto), que recubren a un interior compuesto por grandes cristales euhedrales blancos de yeso. La diversidad de formas es notable y algunas espeleotemas de yeso contienen también otros minerales secundarios asociados, tales como anhidrita, bassanita y thenardita, en distintas combinaciones. El trabajo describe de modo preliminar la cavidad y sus espeleotemas.

Palabras clave: Karst en yeso, Espeleología Física, Geomorfología, Hidrogeología, Mineralogía de Espeleotemas.

ABSTRACT

The work describes the exploration and study of a group of caves located at the base and flanks of a gypsum plateau, situated to the SW of Lerín (Navarra). The cavities are developed in an evaporite unit that occupy the core of the Falces Anticline, composed of gypsum of Sueviense age (Falces Formation, Oligocene, continental Tertiary). Gypsum appears in laminated-nodular lithofacies, of alabastrine appearance, with intercalations of shales and dolomitic levels, with high saline content. The caves form a system and its underground galleries stand out for the large number and diversity of speleothems. These form acicular coatings, frostworks, snowballs, eccentrics and curved crystalline forms of gypsum. Some of them have pinkish and orange tones. There are also curious stalactites of an intense bright black color on the surface (with tar or asphalt look), which cover an interior composed of large white euhedral crystals of gypsum. The diversity of forms is remarkable and some gypsum speleothems also contain other associated secondary minerals, such as anhydrite, bassanite and thenardite, in different combinations. The work describes in a preliminary way the cavity and its speleothems.

Keywords: Karst in gypsum, Physical Speleology, Geomorphology, Hydrogeology, Mineralogy of Speleothems.

INTRODUCCION

En la zona Sur de Navarra existen afloramientos de evaporitas (yesos y sales) que experimentaron procesos de karstificación y espeleogénesis, con el consiguiente desarrollo de simas y cuevas. Previamente habíamos explorado algunos afloramientos de yesos y margas salinas en relieves tabulares próximos a las localidades de Caparrosa, Cárcar y Mendavia, donde encontramos interesantes simas y cuevas (Galán, 2018, Galán et al, 2019 a, b). En esta ocasión nuestras prospecciones se dirigieron al Anticlinal de Falces, en cuyo núcleo aflora un conjunto yesífero de edad Sueviense (incluido en la Formación Falces, Oligoceno, Terciario). En el flanco de una meseta localizamos un sistema de cuevas, con la característica de contener algo que no habíamos encontrado antes en otras cuevas en yeso en el Sur de Navarra: una gran cantidad y diversidad de espeleotemas, de estética remarcable, compuestas por yeso secundario (y minerales asociados), con muy diversas morfologías, texturas y coloraciones.

MATERIAL Y METODOS

En la prospección y exploración de cavidades se utilizaron frontales Leds, cuerda estática e instrumental topográfico Suunto. Se tomaron muestras de espeleotemas, las cuales fueron estudiadas en laboratorio bajo microscopio binocular Nikon y analítica por difracción de rayos X (DRX). Se tomaron fotos a color para ilustrar los rasgos de las espeleotemas y de las cavidades y su entorno.

RESULTADOS

El afloramiento de yesos estudiado en este trabajo se localiza a 2,8 km al SW de la localidad de Lerín (situada a su vez a 44 km al SW de Pamplona), en la base de una meseta (Sierra Perra, que alcanza 409 m snm de altitud en el Alto del Olivo), recortada en su flanco E por escarpes verticales, que dan paso a la llanura aluvial por donde discurre el río Ega. La zona de cuevas se localiza en la base y flancos del escarpe, a 800 m al W del Puente del Rebollar sobre el río Ega.

Las cavidades se desarrollan en una unidad de evaporitas que ocupan el núcleo del Anticlinal de Falces, compuesto por yesos y margas ricos en sales (anhidrita, halita), de edad Sueviense (Formación Falces, Oligoceno). Estos materiales ocupan la base de la subcuenca endorreica Terciaria Navarro-Riojana del Ebro, que se rellenó de sedimentos continentales durante el Oligoceno y Mioceno, para pasar a ser exorreica en el Mioceno final.

El afloramiento estudiado queda incluido en la unidad litológica 312 (Yesos de Falces), que ha sido detalladamente descrita por Faci Paricio et al (2000) y SITNA Navarra. Resumimos a continuación sus principales rasgos.

En superficie la Formación Falces constituye un conjunto yesífero deformado con intercalaciones lutíticas subordinadas. Los yesos aparecen en litofacies laminado-nodulares, presentan un aspecto alabastrino, con frecuentes brechificaciones que dan lugar a texturas poiquiloblásticas, y exhiben frecuentes pliegues enterolíticos y fluidales. De modo característico poseen niveles dolomíticos laminados y carniolares en el seno de los intervalos yesíferos. Los términos lutíticos adquieren mayor desarrollo hacia el techo de la unidad; muestran coloraciones grisáceas a rojizas y su espectro litológico varía de arcillas a margas dolomíticas, registrando en todos los casos, contenidos elevados en yesos. La potencia de la formación se cifra en unos 1000 m como promedio, si bien se pueden alcanzar espesores mayores por migración halocinética hacia núcleos anticlinales (Faci Paricio et al, 2000).

En el subsuelo la formación está representada por anhidrita y halita con intercalaciones lutíticas. Las anhidritas, por lo general, alternan rítmicamente con niveles de sal y, en menor medida, con arcillas y margas, e incluyen delgados horizontes de dolomías laminadas. Por otra parte Salvany (1989) constató la presencia de capas de glauberita entre los términos anhidríticos y halíticos.

Las características de las evaporitas de la Formación Falces indican que su depósito se efectuó en condiciones esencialmente subacuáticas por concentración de salmueras sulfatado-cloruradas en una zona interna de un sistema lacustre salino estable.

En nuestras exploraciones nos dirigimos primero al centro de la base del acantilado mayor, donde se abre la boca de la cueva 01, que es la que alcanza mayor desarrollo y presenta un conjunto de galerías con otras bocas que dan al exterior. Luego seguimos la base de la pared hacia el N y remontando una vaguada seca hacia el W. Aquí localizamos la cueva 02 (de pequeñas dimensiones) y varios abrigos y mesocavernas, a distintas alturas sobre el flanco. Retornando a la cueva 01 seguimos explorando la base de la pared hacia el Sur, localizando otros abrigos y la interesante cueva 03. Ascendiendo a la parte alta de la meseta, recorrimos todo el borde hacia el N. Lo que visto de lejos parecían ser posibles simas colgadas en repisas, resultaron sólo grietas abiertas hacia el borde, aunque con algunos conductos excavados sobre una falla de borde proclive a colapsar. También observamos pequeños abrigos u oquedades colgadas en la parte superior de las paredes, pero sin continuaciones practicables.

Siguiendo hacia el N cruzamos la vaguada o valle seco donde está la cueva 02 para seguir prospectando un segundo escarpe, de menor desnivel, situado algo más al N. En su base localizamos y exploramos varios abrigos y la cueva 04 (de modestas dimensiones) pero sin encontrar más cavidades.

Aunque se trata de cuatro cuevas independientes, las tres primeras forman un único sistema sobre las paredes del acantilado Sur, separado por la vaguada de las paredes del acantilado N, donde se encuentra la cueva 04. En ambos escarpes hay un gran número de abrigos menores y, sobre todo, de mesocavernas (conductos menores de 20 cm de diámetro), no accesibles al ser humano pero formados por el mismo proceso de karstificación en zona de borde. Seguramente con probables interconexiones entre pequeños vacíos en las tres dimensiones del volumen de roca (a modo de un queso gruyère), que no es factible recorrer.

En todo caso, lo más significativo de estas cuevas, es la extraordinaria abundancia y diversidad de espeleotemas que presentan todas ellas. Las espeleotemas de yeso no son raras, y en la región Sur de Navarra las espeleotemas aciculares y frostworks de yeso con comunes en infinidad de cuevas en arcilla de edad Mioceno en la región de las Bardenas (Galán, 2015), pero hasta la fecha no habíamos encontrado espeleotemas en las cuevas en yeso exploradas en otros afloramientos de evaporitas de edad Oligoceno en esta región (Galán, 2018; Galán et al, 2019 a, 2019 b). Su profusión es extraordinaria y de estética llamativa, con una gran diversidad de formas, texturas y coloraciones, predominando ampliamente las espeleotemas algodonosas que parecen nieve recién caída (gypsum cottonballs y snowballs), así como excéntricas y estalactitas globulares negras. Además de yeso algunas de ellas contienen otros sulfato-minerales relacionados, tales como anhidrita, bassanita y thenardita.

DESCRIPCIÓN DE LAS CAVIDADES Y SUS ESPELEOTEMAS

Cueva de Sierra Perra 01.

Situación: En la base del acantilado Sur, en su parte central, a 800 m al W de la orilla del río Ega.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.701.052; E 582.280; Altitud 355 m snm.

Dimensiones: Desnivel: +4 m; Desarrollo espacial: 82 m. Figuras 01 á 18. Plano en Figura 34.

Descripción: La boca de la cueva es un amplio abrigo techado, con un gran bloque desprendido adosado a la pared, tras el cual la cavidad se divide en dos galerías, de 2 m de ancho x 3-4 m de alto c/u, que se amplían hacia su interior. La galería Sur es la de mayor recorrido; presenta un tramo de 10 m de largo que se amplía en su fondo, donde dobla en ángulo hacia el S para seguir 20 m hasta una sala de 7 m de ancho. De la sala parte una corta galería hacia el SE que comunica otra vez con la base de la pared externa a través de dos arrastraderos. La continuación de la sala hacia el S el alta de 8 m pero esta tapiada hasta media altura por un muro o cerramiento artificial de piedras construido para cerrar la sala, la cual sirvió en el pasado como un refugio o corral para guardas cabras (en el exterior hay también restos derruidos de una antigua borda de pastor). Esta tapia interrumpe la base de una corta galería que conduce a otra boca amplia, aunque puede pasarse trepando +3 m por encima.

Entre la ampliación en ángulo y la sala discurre en paralelo una galería más corta (galería W), de 1,5-2 m de diámetro medio y 8 m de largo. En su extremo N forma también un nicho cegado, con pequeños conductos.

La galería N se abre tras pasar el bloque del pórtico de entrada. Se puede acceder a ella trepando sobre el bloque para después descender o bien a través de un laminador por debajo del mismo. Esta galería se dirige hacia el NW. Tiene un primer tramo amplio, de 8 m de largo, y prosigue en galería arrastradero 6 m, con ramificaciones en pequeños conductos, no practicables.

Los suelos son subhorizontales y están cubiertos de rellenos arcillosos y pulverulentos, muy secos en toda la extensión de la cueva. En algunos puntos hay algunos clastos y bloques fragmentados de los estratos de yeso con intercalaciones de lutitas.

Las espeleotemas son abundantes en toda la cavidad. En la galería de acceso y pórtico de entrada, al lado de un gran bloque, predominan formas algodonosas que parecen nieve recién caída, algunas con tonalidades rosas. Estas se encuentran también en el interior, en menor escala. Pero en las paredes de las galerías principales de la cueva predominan recubrimientos ténues de espeleotemas aciculares y frostworks de yeso, con aspecto de barbas. Existen también costras y recubrimientos blancos y grises, más duros. La mayoría de estas espeleotemas están constituidas por tramas muy delicadas (que se deshacen con solo tocarlas en fino polvo), de yeso secundario. Algunas costras poseen anhidrita y bassanita asociada al yeso. La pequeña galería W contiene espeleotemas de los mismos tipos pero destaca además en ella el desarrollo de muchas excéntricas o helictitas, cristalinas, de pocos mm hasta 8 mm, así como aislados cristales curvos de yeso, de hasta 1,5 cm de largo. La galería N presenta recubrimientos algodonosos de tipo nieve y algodón de azúcar, y en su parte interna recubrimientos y costras de yeso de distintos colores, blancos, amarillentos, ocre y rojizos. En partes de su bóveda hay también zonas grises y negras, opacas. En parte estas coloraciones se deben a la presencia de intercalaciones arcillosas y dolomíticas en la serie yesífera.

Cueva de Sierra Perra 02.

Situación: En la base del acantilado Sur, sobre la pared que contornea una vaguada lateral, a 30 m al N de la cueva 01.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.701.080; E 582.275; Altitud 360 m snm.

Dimensiones: Desnivel: 0 m; Desarrollo espacial: 14 m. Figuras 19 á 21. Plano en Figura 34.

Descripción: Consta de dos bocas. La primera forma un abrigo de 6 m de ancho x 2 m de alto, que profundiza 3 m. A su lado se abre la boca de una galería menor, de 4 m de longitud y 1,5 m de diámetro, con pequeños conductos en su fondo. Uno de ellos comunica a través de un estrecho laminador con el fondo del primer abrigo. La cavidad presenta numerosos recubrimientos aciculares y frostworks de yeso blancos y grisáceos, igualmente delicados y frágiles.

Cueva de Sierra Perra 03.

Situación: En la base del acantilado Sur, a 36 m al S de la cueva 01.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.701.016; E 582.278; Altitud 358 m snm.

Dimensiones: Desnivel: +2 m; Desarrollo espacial: 18 m. Figuras 22 á 27. Plano en Figura 34.

Descripción: La boca de la cueva tiene 2 m de ancho x 2,5 m de altura y prosigue en galería amplia 14 m. Presenta recubrimientos de espeleotemas aciculares y frostworks de yeso, de colores blancos. En su parte terminal hay una galería en paralelo, más elevada, formando una especie de nicho, de 4 m de largo. En el techo del fondo de la cueva, pero sobretudo en este nicho, destaca la profusión de estalactitas globulares, estalactitas y protuberancias cónicas, de un contrastante color negro, intenso y brillante, con la apariencia viscosa de la brea o el alquitrán. Al tocarlas se aprecia que se trata de espeleotemas sólidas, duras y bien cristalizadas, que no manchan al tocarlas. Sorprende su superficie brillante, de aspecto "húmedo", como si se tratara de geles de hidróxidos de hierro, pero por el contrario son secas. Al corte, para tomar muestras, se aprecia que se trata de cortezas, de 0,4 á 1 cm de espesor, que recubren un interior cristalino blanco compuesto por el crecimiento de cristales euhedrales de yeso, con facetas de brillo nacarado y con algunas laminillas translúcidas. Es decir, que se trata de estalactitas de yeso, de varios cm de espesor (hasta 6 cm en las formas cónicas), que en su parte distal cambian a un color negro, con superficie brillante.

Cueva de Sierra Perra 04.

Situación: En la base del acantilado Norte, en su parte central, a 80 m al N de la cueva 01.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.701.130; E 582.287; Altitud 362 m snm.

Dimensiones: Desnivel: +2 m; Desarrollo espacial: 16 m. Figuras 28 á 33. Plano en Figura 34.

Descripción: La boca de la cueva es un abrigo o entrante techado, con dos galerías superpuestas. La superior, a +2 m sobre el suelo, forma un nicho de 3 m de ancho y 4 m de profundidad. La inferior, a nivel de suelo, es una galería ascendente, de techo bajo y 8 m de largo, que se estrecha en su fondo. Esta última, a pesar de sus modestas dimensiones, posee extensos recubrimientos algodonosos y frostworks de yeso, blancos y grises. Algunos de ellos cuelgan como barbas de hasta 8 cm de espesor. En una de las muestras se detectó la presencia de thenardita, además de yeso.

Al respecto, es oportuno mencionar que en las paredes externas de ambos acantilados hay también zonas con eflorescencias blancas de halita, indicadoras del alto contenido en sales que presenta la serie yesífera.

Las cuatro cuevas catalogadas suman 128 m de desarrollo. Pero hay un conjunto mayor de abrigos y pequeñas oquedades sobre fracturas y formando mesocavernas. Las cuevas se han formado por procesos de disolución de los materiales yesíferos en la zona de borde del acantilado, muy fracturado por procesos clásticos de descompresión mecánica de la roca-caja.

Todas las cuevas son de ambiente muy seco, con suelos de materiales arcillosos polvorientos y sin ocurrencia de espeleotemas a nivel del suelo y base de las paredes. La temperatura media en la región, de clima árido, es de 14°C, con precipitaciones del orden de 450 mm/a. En verano son frecuentes las altas temperaturas (hasta 40°C) y en invierno las heladas, ya que se trata de un clima mediterráneo de carácter continental. La localización de las cavidades sobre paredes desprovistas de vegetación y orientadas al E hacen que se trate de un ambiente de roquedo, soleado y seco, con escasa actividad hídrica, de carácter temporal y limitada a la escasa infiltración que recibe la zona de borde los días de lluvia. Sin embargo, como puede verse, ha conseguido formar a lo largo del tiempo un conjunto de cavidades de cierta extensión y volumen interno en los yesos. Es probable también que parte de cavidades antiguas haya resultado destruido por la erosión y colapso del frente del acantilado, en activo retroceso en la actualidad. Lo que puede apreciarse por el desprendimiento de bloques y lienzos enteros de roca.

La temperatura interna en las cuevas durante las exploraciones, a inicios del otoño, era de 16°C, con una humedad relativa inferior al 50%. El ambiente interno en las galerías es muy seco y ventilado, dada la ocurrencia además de múltiples bocas. No obstante, no notamos corrientes de aire apreciables. La cueva mayor, 01, fue usada en el pasado para el resguardo de cabras, y actualmente se observan algunos excrementos antiguos de estas. Muchas de las cuevas y abrigos pequeños poseen en su fondo lechos o nidos de paja o hierbas secas, que utilizan como madriguera algunos mamíferos. Observamos restos de zorro y numerosos restos óseos dispersos de conejos y pequeños roedores (ratoncitos y topillos). No fueron observados quirópteros, pero es muy posible que algunas especies utilicen la cueva como refugio invernal.

Destaca en cambio la gran profusión de espeleotemas, básicamente de yeso, y las diversas texturas y formas que adoptan. Muchos de los delicados crecimientos de frostworks, snowballs, cottonballs y acículas de yeso, parecen ser de naturaleza efímera, es decir, que se pueden destruir y volver a formar varias veces a lo largo del ciclo anual, asociados a las variaciones climáticas. Aspecto que será discutido con mayor extensión en el próximo apartado.

MINERALOGÍA DE ESPELEOTEMAS

Fueron tomadas muestras de espeleotemas en las cuevas 01, 03 y 04. A pesar del cuidado puesto en su extracción y transporte en bolsitas plásticas protegidas, dada la extrema fragilidad de las mismas, la mayoría de ellas llegaron a laboratorio muy deshechas en pequeños restos fragmentados y/o pulverulentos, con excepción de las muestras de espeleotemas negras de la cueva 03, muy sólidas y duras, y a las que pudimos tomar algunos fotos ilustrativas de su morfología al corte.

Las muestras de la cueva 01 incluyeron formas algodonosas y boxworks tipo barbas, recubrimientos blancos, costras blancas con sobre-crecimientos de helictitas o excéntricas, y costras con sobre-crecimientos de frostworks. En todas ellas la analítica DRX sólo detectó yeso, con la excepción de una muestra del último tipo (costra porosa de espesor milimétrico, a la que se atacaba la base de frostworks). En esta muestra se detectó la ocurrencia mayoritaria de yeso junto a cantidades menores de anhidrita y bassanita. En las muestras de la galería N, de recubrimientos algodonosos de tipo snowballs y cottonballs, así como de costras delgadas (de colores amarillentos, ocre y rojizos) sólo se detectó por DRX la ocurrencia de yeso.

En las muestras de espeleotemas negras de la cueva 03, sorprendentemente, sólo se detectó yeso, tanto en la parte externa negra como en la parte interna de cristales euhedrales blancos. Tampoco se detectó contenido en C orgánico. No obstante, la observación al microscopio sugiere que la costra negra corresponde o ha experimentado algún tipo de alteración.

En las muestras de la cueva 04, de recubrimientos algodonosos y frostworks de yeso que cuelgan como barbas (por lo demás muy similares a los de la cueva 01), se detectó yeso en una de las muestras y yeso junto con thenardita en otra de ellas, esta última de color sólo algo más grisáceo.

La interpretación que es posible hacer a partir de estos datos, como veremos, es restringida. Conviene señalar que las identificaciones por DRX son válidas para las muestras analizadas. Por analogía, atribuimos igual composición a espeleotemas de aspecto y morfología similares (como muchas de las mostradas en las fotos que acompañan a este texto), pero esto encierra mayor incertidumbre y en algunos casos resulta difícil precisar, porque varios minerales distintos pueden tener aspectos parecidos o presentarse combinados, así como también, una única especie mineral puede presentar diversas formas de ocurrencia. Es muy probable por ello que existan más fases minerales y minerales secundarios distintos (formando espeleotemas) que los reportados, pero sería necesario un esfuerzo analítico mayor, con técnicas más refinadas, para caracterizar sus composiciones.

Las espeleotemas de yeso (sulfato de calcio hidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Monoclínico) son las más comunes y predominantes en este conjunto de cuevas. Ello no extraña, porque este mineral se encuentra ampliamente disponible en la roca-caja. Se trata de cristalizaciones secundarias a partir de las aguas subterráneas que percolan la serie yesífera, las cuales precipitan por evaporación de las soluciones. Ello es posible porque el yeso es muy soluble y el ión sulfato posee una reactividad comparativamente alta, siendo muy frecuente en las aguas subterráneas, en distintas litologías.

Ha sido hallado en todas las cavidades exploradas, generalmente en forma de recubrimientos aciculares milimétricos, extensos, y de colores blancos a grisáceos. Las agujas cristalinas son muy delgadas (0.2 mm) y largas (2-5 mm), formando recubrimientos densos sobre paredes secas, donde las agujas crecen en paralelo o formando pequeñas borlas o formas radiales. Sobre o entre ellas hay también recubrimientos delicados y densos que despliegan crecimientos radiales (frostworks) y tramas con formas algodonosas de intrincado diseño, muy delicadas y que recuerdan al algodón de azúcar o a nieve recién caída. Muchas de ellas, sobre aristas o salientes, pueden formar proyecciones colgantes en forma de barbas de cierto espesor. Algunas formas níveas tienen tonalidades rosadas. Todas estas espeleotemas de yeso son muy delicadas y se deshacen o desintegran al tocarlas.

Observados al microscopio los frostworks de yeso despliegan una estructura radial, creciendo las espículas en todas las direcciones del espacio, a partir de una base común. En las formas algodonosas, la trama es más compleja: pueden crecer agujas radiantes de aspecto espinoso, formas filamentosas que se unen en engrosamientos con aspecto de gotas, y tramas conjugadas de diversas formas, siempre de muy débil diámetro. Hay incluso filamentos curvos y anastomosis de formas filamentosas.

Maltsev (1990, 1993) ha sugerido que muchos frostworks de yeso son efímeros y su formación puede deberse a la disolución de yeso por agua de condensación, causada por variaciones microclimáticas y en el flujo de aire, y ha reportado para cuevas en yeso en Ucrania la formación de frostworks de yeso por diferencias estacionales en el flujo de aire. Los frostworks crecen durante los meses de verano, cuando baja la humedad relativa a 70-90%, y se disuelven parcialmente durante el invierno, cuando la humedad se eleva y se aproxima al 100%. En invierno, films de aguas de condensación atacan los frostworks de yeso en su base (o contacto con las paredes), causando su desprendimiento de las paredes y su caída como nieve o polvo al suelo de la cueva. En los meses de verano, el agua de condensación produce evaporación y se forman los delicados cristales de los frostworks.

Las espeleotemas de anhidrita (sulfato de calcio anhidro CaSO_4 . Ortorrómico) se forman por deshidratación de yeso, bien a temperaturas altas o bien por la evaporación de soluciones salinas (Hill & Forti, 1997). La anhidrita fue detectada por DRX en una de las muestras de la cueva 01, donde formaba costras blancas sobre la pared, en la base de frostworks, de aspecto similar al de otras costras blancas de yeso y asociada en la misma muestra a yeso y bassanita. Probablemente la anhidrita se ha formado por deshidratación de yeso, en condiciones muy secas en esa parte de la cueva, lo que impide su rehidratación en yeso.

Las espeleotemas de bassanita (sulfato de calcio hemihidratado $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Trigonal), como ha sido dicho, se detectaron en costras blancas junto a anhidrita y yeso. La bassanita se forma por la deshidratación de yeso a temperatura alta y puede formar costras y frostworks. El yeso y la anhidrita suelen estar asociados en la naturaleza. La bassanita es una variedad intermedia, normalmente producida durante la transformación de anhidrita en yeso.

Las espeleotemas de thenardita (sulfato de sodio Na_2SO_4 . Ortorrómico) normalmente se forman en las cuevas a partir de mirabilita (sulfato de sodio muy hidratado $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Monoclínico), siendo muy frecuente en cuevas y tubos de lava. La thenardita es un producto de la deshidratación de la mirabilita. Cuando la mirabilita se expone al aire seco rápidamente se deshidrata y se transforma en thenardita. Espeleotemas de thenardita han sido reportadas en cuevas en distintas partes del mundo (en forma de cottonballs, snowballs, cabellos de ángel y cristales aciculares) y también aparece como eflorescencias en suelos en regiones áridas. En nuestro caso ha sido detectada por DRX en una muestra de frostworks de la cueva 04.

La diversidad de los sulfato minerales encontrados en las espeleotemas de este conjunto de cuevas de Sierra Perra, es debida a la variable estabilidad de los distintos minerales secundarios, a la disponibilidad de los distintos constituyentes en la litología de la serie yesífero-margosa que atraviesan las aguas de infiltración, y, por último, a las variaciones microclimáticas en temperatura (T), humedad relativa (HR) y corrientes de aire, en distintos puntos de las cuevas.

La estabilidad de las diferentes espeleotemas de yeso es altamente dependiente de su solubilidad. El yeso es estable cuando está expuesto al aire de las cuevas a temperaturas y humedades ordinarias, pero cuando es expuesto a temperaturas altas y baja humedad, se deshidrata a bassanita, un mineral metaestable, el cual, con el tiempo, espontáneamente se revierte a anhidrita. La anhidrita puede también formarse en soluciones salinas de agua en cuevas a T y HR normales.

La mirabilita es un mineral salino que se forma por precipitación a partir de salmueras de sulfato-cloruro de sodio (frecuentes en evaporitas) y, de modo parecido, se deshidrata y se transforma con facilidad en thenardita en climas áridos.



Figura 01. Acantilado o escarpe Sur, de 25 m de desnivel, en la parte alta del flanco Este de Sierra Perra. En la base, en su parte central, se abren las bocas de las cuevas 01 y 03.



Figura 02. La boca central de la cueva 01 (arriba) y pequeños abrigos, cavidades y mesocavernas en la base de la pared (debajo), con eflorescencias salinas.



Figura 03. Pórtico de entrada de la cueva 01 (arriba), con el bloque y la galería N al fondo. Debajo: Espeleotemas de yeso que recuerdan a nieve recién caída (snowballs, cottonballs) en la galería de acceso, con algunas tonalidades rosadas. Obsérvese que se forman a partir de soluciones que han manado de los planos de estratificación.



Figura 04. Galería central de la cueva 01, con recubrimientos de espeleotemas blancas de yeso (aciculares, formas barbadadas, frostworks). El polvo gris en partes del suelo es formado por la desintegración y caída de las mismas.



Figura 05. Vista hacia la boca central y detalles de snowballs y frostworks de yeso. Puede apreciarse la existencia de mesocavernas a distintas alturas.



Figura 06. Detalle de frostworks y costras de yeso en la galería principal de la cueva 01. Algunas de ellas contienen anhidrita y bassanita asociada a yeso.



Figura 07. Galería lateral, con dos pequeñas bocas abiertas al exterior, y otra zona con espeleotemas en bandas blancas y rojizas, con pequeños sobrecrecimientos botroidales y excéntricos.



Figura 08. Galería W con recubrimientos aciculares, frostworks, barbas, proyecciones colgantes, excéntricas, muchas de ellas con crecimientos radiales y cristales curvos, y helictitas aisladas de hasta 1,5 cm de longitud.



Figura 09. Galería W y detalle de grandes cottonballs, de hasta 5 cm de espesor.



Figura 10. Detalles de costras, recubrimientos aciculares y excéntricas en las galerías de la cueva 01.



Figura 11. Detalles de crecimientos de excéntricas junto a frostworks y tapices aciculares de yeso (arriba) y una especie de colada sobre el talud de una pared, con excéntricas y largas formas tubulares, de varios cm (debajo).



Figura 12. Diversidad de espeleotemas barbadas, snowballs y frostworks en las paredes de la gran sala central.



Figura 13. Galería de acceso y snowballs con morfologías que recuerdan a nieve recién caída.



Figura 14. Acceso a la galería Norte de la cueva 01, con diversidad de espeleotemas y zonas negras en el techo.



Figura 15. Galería Norte, con lutitas y margas en estratos intercalados del techo, que tiñen de tonalidades ocre y rojizas a las espeleotemas de yeso.



Figura 16. Diversidad de coloraciones en las espeleotemas aciculares de yeso en la galería N, debido a soluciones que atraviesan intercalaciones delgadas de lutitas y margas dolomíticas.



Figura 17. En la galería N hay también numerosos frostworks y proyecciones barbadas blancas de yeso.



Figura 18. Gran diversidad de texturas y coloraciones entre las espeleotemas de la galería Norte.



Figura 19. Vaguada al N del acantilado Sur, con abrigos a distintas alturas (arriba) y abrigo basal donde se abren las bocas de la cueva 02 (debajo), con pequeños bloques y clastos desprendidos de los salientes rocosos.



Figura 20. Pasos estrechos en laminadores de la cueva 02 (arriba) y detalle del fondo, con espeleotemas y costras de yeso, mesocavernas, y nidos de hierba seca que sirven de madriguera a mamíferos (debajo).



Figura 21. Detalles del interior y segunda boca de la cueva 02.



Figura 22. Boca y galería interna de la cueva 03, con espeleotemas blancas en la mayor parte de la cavidad.



Figura 23. Pequeña galería paralela en el fondo de la cueva 03, con numerosas espeleotemas negras formando revestimientos globulares y estalactitas, con aspecto de brea o asfalto.



Figura 24. Espeleotemas negras en la cueva 03, creciendo sobre aristas de yeso y margas dolomíticas grises. Los análisis DRX sólo detectaron yeso y compuestos amorfos en su composición.



Figura 25. Las estalactitas negras con aspecto asfáltico tienen superficies brillantes y alcanzan hasta 4-5 cm de tamaño. Su interior está compuesto de cristales blancos euhedrales de yeso.



Figura 26. Detalle de muestras de espeleotemas negras, donde se aprecia al corte que su interior cristalino es blanco, correspondiendo las partes negras a una corteza o zona alterada superficial, de 0,5-1 cm de espesor.



Figura 27. Boca de la cueva 03 y remontando las paredes del escarpe Sur.



Figura 28. En la parte alta del escarpe se abren varias oquedades que vistas de lejos parecen bocas de simas, pero de trata sólo de fracturas de borde.



Figura 29. Borde del escarpe Sur, con pequeñas cavidades y mesocavernas, colgadas en la pared (arriba) y vista hacia la vaguada y el escarpe Norte, de menor desnivel, en cuyo flanco Este se abre la cueva 04.



Figura 30. Vaguada o valle seco entre los dos escarpes y paredes del escarpe N, con varios abrigos en su base. Se aprecia la boca de la cueva 02 (flecha roja) y otras oquedades en sus paredes (flechas azules).



Figura 31. Cueva 04, en abrigo techado en la base del escarpe Norte, con galerías superpuestas.



Figura 32. Frostworks y formas barbadas de hasta 8 cm de espesor en la galería inferior de la cueva 04. Los análisis DRX mostraron la ocurrencia de yeso y thenardita en una de las muestras.



Figura 33. Abrigos y pequeñas oquedades en el escarpe Norte del flanco Este de Sierra Perra.

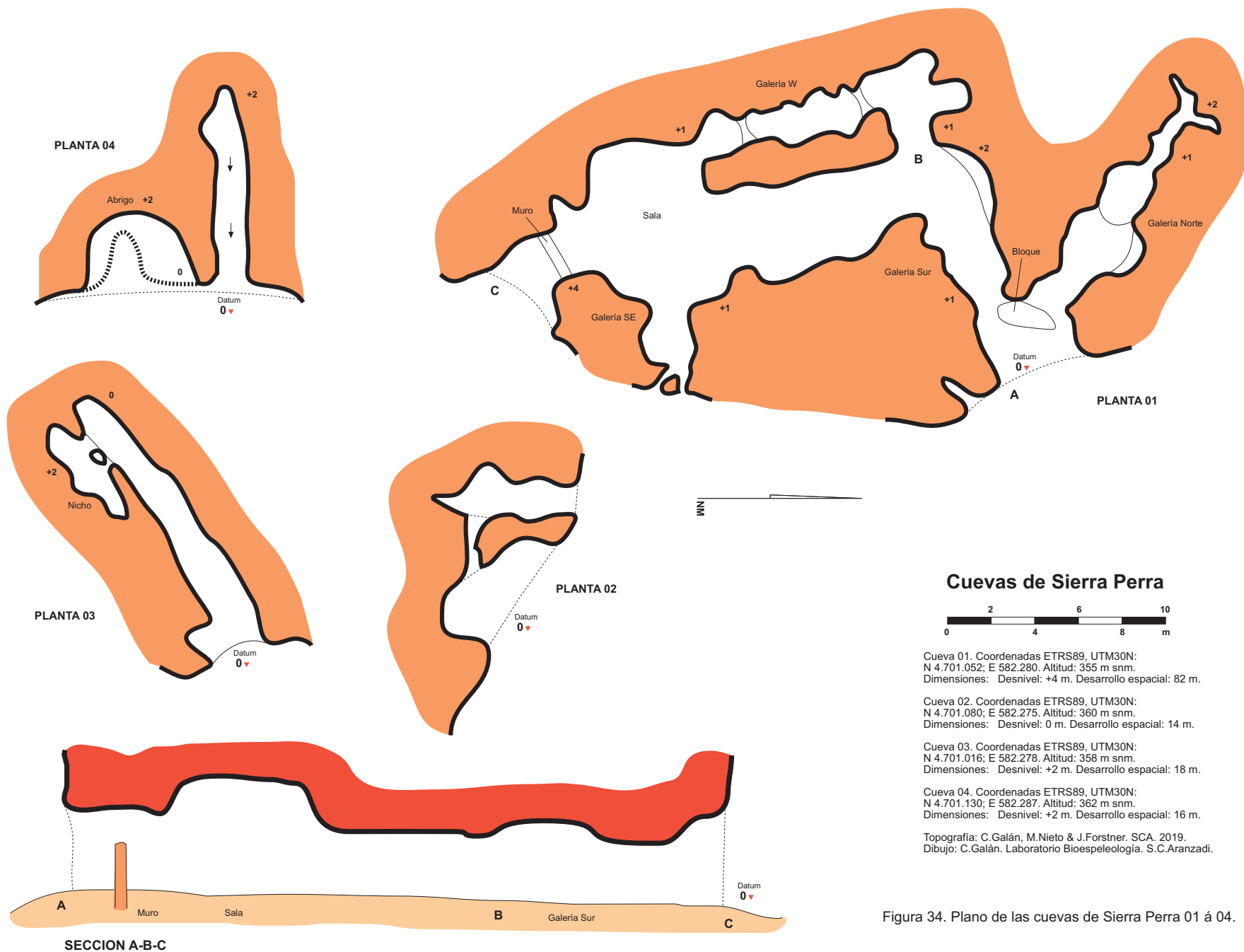


Figura 34. Plano de las cuevas de Sierra Perra 01 á 04.

Todos los constituyentes para formar las espeleotemas reportadas están presentes en los yesos de la Formación Falces y la región en que se encuentran las cuevas es de clima árido, con variaciones estacionales. En verano se alcanzan con frecuencia temperaturas altas y baja HR, y estas variaciones climáticas externas afectan y son seguidas por variaciones microclimáticas en el interior de las cuevas, lo que unido a la estabilidad de las distintas fases minerales, provoca deshidratación en unas estaciones e hidratación y nueva formación de espeleotemas en otras. Creemos que estos mecanismos explican la variabilidad mineralógica encontrada, que luego se traducirá a su vez en una diversidad de formas, texturas y coloraciones en las espeleotemas halladas. Algunos aspectos adicionales son incluidos en la Discusión.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las espeleotemas de anhidrita y bassanita se forman por deshidratación de yeso. Por ejemplo, Hill (1979) ha hallado anhidrita y bassanita, ambas, en cuevas de Texas. Dichas cuevas son pequeñas y tienen valores normales de T y HR que siguen estrechamente las variaciones climáticas externas, las cuales pueden alcanzar los 35°C y 10% de HR, respectivamente, en los meses de verano. En dichas cuevas el sulfato de calcio precipita originalmente de las aguas subterráneas como yeso, y entonces el yeso es deshidratado a bassanita y anhidrita. La anhidrita puede también formarse en soluciones salinas de agua a la T y HR normales en cuevas.

Los sulfato-minerales más solubles son extremadamente susceptibles a variaciones en T y HR. Incluso respirando cerca de ellos pueden deshidratarse y desintegrarse en fino polvo blanco (por ejemplo, en mirabilita y epsomita). Pueden deliquescer cuando la HR se incrementa hasta cierto valor, y pueden eflorescer (formar eflorescencias) cuando decrece bajo dicho valor.

En cuevas en yeso, la morfología normal del yeso es en estalactitas. Las estalagmitas son más raras en las cuevas en yeso debido a que es más difícil alcanzar un equilibrio entre el rápido goteo y la evaporación, que permita el desarrollo de estalagmitas.

En cuevas en caliza, el yeso es el constituyente más común de costras, espeleotemas fibrosas y flores de yeso, y es el único constituyente de las agujas y espadas de selenita, y cristales gigantes de selenita subhedral a euhedral (Hill & Forti, 1997).

Otros sulfato minerales han sido reportados en cuevas en caliza en Georgia, USA. De formas algodonosas, y compuestos por sulfatos dobles de sodio y calcio, cuando fueron removidos de la cueva su estructura acicular colapsó a un polvo de grano fino. En dichas cuevas la T es de 12-15°C, pero la estabilidad de estos sulfato-minerales como función de la HR no es conocida.

La anhidrita se forma por deshidratación de yeso a temperaturas altas o por evaporación de soluciones salinas. Diaconu (1974) fue el primero en reportar la ocurrencia de anhidrita como espeleotemas en una cueva de Rumania, y explica la génesis de este mineral como siendo debida al alto contenido de NaCl_2 y MgCl_2 en agua hidrotermal en dicha cueva. Sin embargo, la más común forma de ocurrencia de anhidrita en cuevas es como recubrimientos y costras. Cody (1978 a, 1978 b) reporta costras de anhidrita en una cueva de Nueva Zelanda, donde el mineral está asociado con yeso, alunógeno y alumbre de potasio (sulfato doble hidratado de Al y K). Anhidrita con bassanita ha sido también reportada por Hill (1979) como costras en cuevas de Texas, donde las costras estaban cementadas y decoloradas a polvo-marrón en sus lados externos y estaban picadas con apariencia esponjosa en sus interiores. En otros ejemplos de cuevas de Israel la anhidrita ocurre como grandes helictitas asociadas a cristales de halita y eran atribuidas a la presencia de soluciones altas en cloruros.

Espeleotemas de thenardita han sido reportadas por Hill (1980) en forma de montículos o bolas de algodón (cotton mounds, cottonballs) en tubos de lava en California. Esta thenardita ocurre asociada a trona (carbonato y bicarbonato hidratado de Na, depositado como evaporita en lagos salinos y que aparece como eflorescencias en suelos en regiones áridas) y cantidades menores de halita, sylvita y yeso. En otros ejemplos la thenardita puede formar snowballs, cabellos de ángel y cristales aciculares. Rogers (1988) también reporta thenardita como recubrimientos, algodón, agujas y moonmilk en otros tubos de lava en California y como polvo suelto con yeso en cuevas de Nuevo México.

En suma, a nivel global, existen diferentes reportes de los minerales hallados formando espeleotemas en cuevas en distintas litologías y regiones del mundo. Las morfologías de frostworks y formas algodonosas, barbadas y frágiles han sido halladas también en cuevas en arcilla, en la región de las Bardenas (Navarra) (Galán, 2015), pero en este caso su profusión resulta excepcional. Los extensos recubrimientos de snowballs con aspecto de nieve recién caída no habían sido hallados previamente en cuevas de la región. La ocurrencia de excéntricas o helictitas de yeso es igualmente extraordinariamente rara a nivel global. Y no hemos hallado en la literatura geológica consultada reportes sobre espeleotemas negras de yeso con aspecto de brea o alquitrán.

Las cuevas de Sierra Perra presentan un conjunto de rasgos geomorfológicos peculiares, debidos a la ocurrencia de sales en el subsuelo y a la existencia de karstificación local en los yesos. La gran cantidad y variedad de espeleotemas de yeso (y sulfato minerales asociados) les confieren además unos atributos estéticos que podemos calificar de remarcables y atractivos. La distinta estabilidad de estos minerales está asociada a su vez a las variaciones microclimáticas de la atmósfera subterránea, y sería interesante al respecto observar si existen variaciones en las distintas ocurrencias de espeleotemas a lo largo del ciclo anual. Lo que podría conducir al hallazgo de otras ocurrencias de minerales adicionales. En todo caso los datos presentados, de naturaleza preliminar, resultan novedosos para cavidades de la región.

Una última reflexión. Al darlos a conocer (por su evidente interés científico) nos exponemos a que personas desconsideradas hagan de estas espeleotemas objeto de vandalismo. Esto ha ocurrido en muchas cuevas en caliza, o está ocurriendo en ejemplos únicos en el mundo, como los del río de leche de luna (moonmilk de gibsita) de la sima-mina de Alzola (Gipuzkoa) o de cavidades, geoformas y paramoudras en areniscas Eocenas de la Formación Jaizkibel. La fragilidad de muchos espacios subterráneos no sólo no soporta el turismo de masas, sino que puede verse afectado por la simple reiteración de visitas de supuestos espeleólogos y montañeros amantes de la naturaleza. Actualmente, además, asistimos a que personas con afán de lucro, figuración y escasa ética utilizan estos ejemplos para sacarse fotos y divulgar "sus logros" a través de blogs y medios de difusión de Internet, con frecuencia recurriendo a omisiones y plagios, por simple afán de figuración, buscando un inmerecido reconocimiento al atribuirse hallazgos y logros de otros, pero que nunca han sido producto de un esfuerzo propio. No somos tampoco partidarios al cierre de cavidades como medida de protección, por parte de la administración, cada vez que se descubre algo interesante. La naturaleza es de todos y sólo se necesita tener mayor conciencia de la fragilidad de estos ambientes y ser respetuosos con los valores que encierran. Esperamos que estas simples reflexiones contribuyan a su conservación, para la actual y las futuras generaciones.

AGRADECIMIENTOS

A todos los compañeros y colaboradores que nos acompañaron en prospecciones anteriores efectuadas en la región Sur de Navarra. A Biosphere Consultancies (United Kingdom), por la analítica de las muestras de espeleotemas por DRX. A dos árbitros de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, por la revisión crítica del manuscrito y sus útiles sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- Cody, A. 1978 a. Thenardite or mirabilite. *New Zealand Speleol. Bull.*, 6 (105): 116-117.
- Cody, A. 1978 b. Ruatapu Cave. *New Zealand. Speleol. Bull.*, 6 (108): 184-187.
- Diaconu, G. 1974. Quelques considérations sur la présence de l' anhydrite dans la grotte Pestera Diana (Baile Herculane, Roumanie). *Trav. Inst. Spéol. E. Racovitza*, 13: 191-194.
- Faci Paricio, E.; F. López; J. Solé; A. Díaz; A. García, P. Hernaiz; A. Martínez & J. Salvany. 2000. Memoria de la Hoja 205-II. Lerín. Mapa Geológico de Navarra, escala 1: 25.000. Gobierno de Navarra. 105 pp.
- Galán, C. 2015. Espeleotemas de yeso, illita, calcita y ópalo CT en cuevas en arcilla (Bardena Negra). *Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF*, 35 pp.
- Galán, C. 2018. Hallazgo de una interesante cavidad en la Formación Yesos de Falces (Caparroso, Navarra). *Publ. Dpto. Espeleo. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF*, 28 pp.
- Galán, C.; M. Nieto; I. Herraiz & A. Miner. 2019 a. Sima en yeso con niveles dolomíticos de edad Oligoceno en el Barranco Salado (Mendavia, Navarra). *Publ. Dpto. Espeleo. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF*, 30 pp.
- Galán, C.; M. Nieto; I. Herraiz & A. Miner. 2019 b. Cuevas de Cárcar: Cavidades en yeso laminado con margas en la base de un acantilado en los márgenes del río Ega (Navarra). *Publ. Dpto. Espeleo. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF*, 18 pp.
- Hill, C. 1979. Recent anhydrite and bassanite in Big Bend National Park caves. *Nat. Speleol. Soc. Bull.* 42 (4): 126-127.
- Hill, C. 1980. Mineralogy of Pisgah lava tubes. *Cave Research Fund., Ann. Report*, 23: p11.
- Hill, C. & P. Forti. 1997. *Cave mineral of the World. Second. Ed. Nat. Speleol. Soc., Huntsville*, 464 p.
- Maltsev, V.A. 1990. The influence of seasonal changes of cave microclimate upon the genesis of gypsum formations in caves. *Nat. Speleol. Soc. Bull.* 52 (2): 99-103.
- Maltsev, V.A. 1993. Minerals of the Cupp-Coutunn karst cave system, southeast Turkmenistan. *World of Stones, Moscow, Plus Ltd.*, 2: 5-30.
- Rogers, B. 1988. Noncarbonate minerals in California caves (abs.). *Proc.Nat.Speleol.Soc. Conv., Hot Springs (South Dakota)*, p.1-4.
- Salvany, J. 1989. Las formaciones evaporíticas del Terciario continental de la cuenca del Ebro en Navarra y La Rioja. *Litoestratigrafía, petrología y sedimentología. Tesis Doctoral, Univ. Barcelona*, 397 pp.