

**NOTAS SOBRE FAUNA Y ESPELEOTEMAS EN LA MINA DE LOS ALEMANES Y
MINAS DE TXANGO (NAVARRA).**

Notes on fauna and speleothems in the Mine of the Germans and Mines of Txango (Navarra).



Carlos GALÁN, Marian NIETO, Ainhoa MINER & Juliane FORSTNER.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi. Noviembre 2017.

NOTAS SOBRE FAUNA Y ESPELEOTEMAS EN LA MINA DE LOS ALEMANES Y MINAS DE TXANGO (NAVARRA).

Notes on fauna and speleothems in the Mine of the Germans and Mines of Txango (Navarra).

Carlos GALÁN, Marian NIETO, Ainhoa MINER & Juliane FORSTNER.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Noviembre 2017.

RESUMEN

La presencia de fauna cavernícola en antiguas minas del País Vasco y Navarra es algo habitual. Sin embargo, no siempre se cumple. Y diversos factores pueden influir en la biodiversidad y abundancia encontradas. Las minas de cobre, galena argentífera y minerales de hierro de Txango se desarrollan en pizarras de edad Paleozoico, en un valle localizado en el Norte de Navarra. Las prospecciones efectuadas llamaron nuestra atención por dos hechos: la abundante y voluminosa ocurrencia de espeleotemas de oxi-hidróxidos de hierro y la notable escasez de fauna. La actividad hidrogeológica, el alto contenido en metales y la ocurrencia de campos magnéticos pueden influir en las características observadas. El trabajo describe las minas y discute su ecología y probables factores que influyen en los rasgos geobiológicos encontrados.

Palabras clave: Biología subterránea, Ecología, Espeleología, Minas de cobre, Espeleotemas, Quirópteros.

ABSTRACT

The presence of cave fauna in old mines of the Basque Country and Navarre is something habitual. However, it is not always true. And various factors can influence the biodiversity and abundance found. The copper mines, argentiferous blue lead and iron minerals of Txango are developed in slates of Palaeozoic age, in a valley located in the North of Navarre. The surveys carried out drew our attention to two facts: the abundant and voluminous occurrence of speleothems of iron oxyhydroxides and the remarkable scarcity of fauna. The hydrogeological activity, the high content of metals and the occurrence of magnetic fields can influence the observed characteristics. The work describes the mines and discusses their ecology and probable factors that influence the geobiological features found.

Keywords: Subterranean biology, Ecology, Speleology, Cooper mines, Speleothems, Bats.

INTRODUCCION

El medio subterráneo comprende cuevas y sistemas de vacíos en distintas litologías. Las minas y otras cavidades artificiales pueden estar en comunicación con redes de fisuras y vacíos menores. Una vez cesada la actividad extractiva, el paso del tiempo y la infiltración de las aguas van retrabajando y remodelando los espacios subterráneos. Las galerías de mina abandonadas pueden así compartir diversas características con las cuevas naturales. Además de la oscuridad total, circulaciones hídricas y alta humedad relativa, en ellas pueden formarse espeleotemas y rellenos sedimentarios, comparables a los que ocurren en cuevas naturales.

Las minas, desde un punto de vista ecológico, constituyen un hábitat de reciente creación, susceptible de ser colonizado y poblado por microorganismos y animales cavernícolas (Galán, 1993; Galán & Herrera, 1998). Tanto la disolución por las aguas de infiltración como la actividad metabólica de microorganismos (principalmente bacterias), pueden dar lugar a procesos de meteorización de las rocas y formación de nuevos minerales secundarios o espeleotemas.

A medida que se incrementa la infiltración, se amplían las fisuras de la roca y se produce la captura y formación de sistemas de drenaje subterráneo, que desaguan hacia las galerías de mina, inundándolas. De este modo se crea un sistema hipógeo en roca inicialmente compacta, que, aunque en su origen es artificial, progresivamente va adquiriendo rasgos que lo asemejan a cavidades naturales, en variable grado. Una suma de rasgos que resultan en consecuencia de interés para la Biología subterránea, la Mineralogía de espeleotemas y la Karstología.

Las formaciones secundarias en minas y cavidades artificiales son mucho menos frecuentes y mucho más pequeñas que las espeleotemas presentes en cuevas naturales. Hecho debido principalmente a que han dispuesto de escaso tiempo para formarse (sólo algunas decenas a cientos de años), mientras que las espeleotemas en cuevas naturales presentan un período de crecimiento mucho mayor (hasta de cientos de miles a millones de años) (Hill & Forti, 1997). No obstante, en algunos casos, como el que nos ocupa, estas formaciones en cavidades artificiales pueden crecer lo suficiente para enmascarar completamente la forma de las paredes y bóvedas. A su vez, las espeleotemas en minas pueden ser mucho más variadas mineralógicamente que las halladas en cuevas naturales, debido a las diferentes clases de rocas y componentes químicos involucrados en su génesis. Cabe decir que el estudio de tales minerales puede ayudar a la comprensión de los modos de formación de otras espeleotemas en cuevas y a una mejor comprensión de los procesos de espeleogénesis en litologías no-calizas.

Las minas que exploramos y describimos en este trabajo han llamado nuestra atención por los importantes volúmenes que contienen de espeleotemas y depósitos secundarios de oxi-hidróxidos de hierro, por los campos magnéticos que ellos o la propia roca-caja generan, y por la ausencia casi total de fauna hipógea. En otras minas exploradas en el País Vasco y Navarra, en mayor o menor grado siempre encontramos cierta diversidad de invertebrados cavernícolas, incluyendo especies troglobias, tanto en minas en afloramientos de caliza (Galán, 2003, 2006; Galán & Leroy, 2003, 2005; Galán & Vera Martin, 2009; Galán et al, 2004, 2014, 2017) como en filones polimetálicos en esquistos y pizarras de edad Paleozoico (Galán, 2003, 2017; Galán & Nieto, 2016; Galán et al, 2012, 2014, 2016). En este caso se trata de minas en pizarras del macizo Paleozoico de Aldudes - Quinto Real (situado en la frontera entre Navarra y Francia), los cuales siguen mineralizaciones filonianas hidrotermales, de paragénesis compleja, donde se explotaron principalmente cobres grises argentíferos. La asociación mineral está constituida por cobres grises, calcopirita, esfalerita, galena, bournonita y pirita, y de minerales supergénicos como malaquita, azurita y óxidos de hierro, en una ganga de cuarzo y siderita/ankerita. La galena y los cobres grises son argentíferos. La litología de estos filones difiere de la encontrada en otros trabajos previos en terrenos Paleozoicos, ya que sus mineralizaciones contienen altos tenores en Cu, lo que suscitó nuestro interés para efectuar prospecciones en busca de fauna cavernícola y/o rasgos geológicos distintivos o curiosos.

MATERIAL Y METODOS

En la prospección de las cavidades se utilizaron las técnicas habituales en espeleología. La fauna observada fue identificada en campo hasta distintos niveles taxonómicos, según los grupos zoológicos. Se tomaron diversos datos sobre las características hidrológicas, geológicas, mineralogía de espeleotemas y sedimentos. Algunas muestras de espeleotemas fueron identificadas en laboratorio por sus propiedades físicas, observación de su hábito bajo microscopio binocular, y por comparación de rasgos con otras muestras de minas estudiadas en trabajos anteriores y que contaban con analítica detallada. Se revisó bibliografía sobre la actividad minera en la región y se tomaron fotografías (con una cámara Nikon) para ilustrar los principales rasgos geobiológicos de las minas. Se efectuó una interpretación de conjunto de los datos obtenidos.

RESULTADOS

El macizo de Aldudes - Quinto Real, junto con los macizos de Cinco Villas y de Oroz - Betelu, constituye la parte más occidental de la Zona Axial pirenaica en la que afloran materiales del Paleozoico y del Triásico en Navarra. Estratigráficamente los terrenos más antiguos son del Ordovícico y Silúrico. En la zona de Txangoa afloran cuarcitas, esquistos y pizarras, de colores oscuros, de edad Ordovícico. Todo el conjunto Paleozoico se encuentra fuertemente replegado y fracturado, como consecuencia de las dos grandes orogénias: la hercínica y la alpina, al final del Carbonífero y del Oligoceno, respectivamente.

El valle de Txangoa, afluente del río Irati, se sitúa entre Roncesvalles y la Selva de Irati, y la zona de minas a 3 km al NW de La Fábrica de Orbaiceta y a 1 km al Sur de la frontera franco-española. Las coordenadas ETRS89, UTM 30N, de las dos minas exploradas son las siguientes: Mina de Txangoa: N 4.765.700; E 642.208, altitud: 940 m snm. Mina de los Alemanes: N 4.765.250; E 642.336; altitud: 1.050 m snm. En la primera de ellas exploramos la galería denominada Mina Txangoa Oeste o Mina Santa Ana, de 220 m desarrollo, y en la segunda o Mina del Filón de los Alemanes, su galería principal, de 180 m de desarrollo. Ambas minas tienen pozos actualmente inundados y galerías colapsadas o completamente inundadas adicionales, que no es factible recorrer, por lo que el conjunto prospectado comprende 400 m de galerías. A continuación exponemos un resumen (modificado) de extractos de referencias históricas tomadas de la Minería en Navarra (Trapote Redondo et al, 2010).

En el Macizo de Quinto Real aparecen algunas de las mineralizaciones de Cu más significativas de Navarra y que tuvieron cierta importancia minera en el siglo XIX. Son de morfología filoniana y encajan en varias unidades litoestratigráficas de las diferentes que afloran en este sector. Las principales mineralizaciones de Cu, son las siguientes.

- La *Mina de Txangoa (Mina Santa Ana)*, en el término de Orbaiceta, es la más conocida de todas. En ella se explotó una mineralización filoniana que fue explotada ya en el siglo XIX. El filón, afectado por fracturas y en una zona bastante tectonizada, tenía una potencia media de 1 m, aunque con engrosamientos de hasta 4 m y estrechamientos decimétricos.

Las labores de explotación afectaban a unos de 200 m de filón, aunque su corrida podría ser algo superior. El relleno es de cuarzo, en el que los minerales metálicos aparecen dispersos y en nidos, aunque también lo hacen en pequeñas venillas y alineaciones dentro del cuarzo. La asociación mineral está constituida por cobres grises, calcopirita, esfalerita, galena, bournonita y pirita, con malaquita y óxidos de hierro supergénicos. La galena (sulfuro de plomo) y los cobres grises son argentíferos. Existen dos pozos principales distantes 80 m, alineados según la dirección del filón, y otro, sin revestir. Hay galerías en dirección uniendo los pozos, actualmente inundadas, calicatas y trincheras que pasan a socavones, ya por encima del nivel del río Txangoa.

La mina de Txangoa estuvo en actividad en diferentes épocas, en particular a fines del siglo XIX, bajo la dirección de Stuart Menteath entre los años 1879 a 1887, y principios del XX. Aparece citada ya en una estadística navarra en 1849, especulándose con una posible producción acumulada en esa época de 7.000 a 8.000 quintales de mineral (sobre todo cobres grises), con una concentración de plata de 4 onzas/quintal. La producción era de 700 quintales métricos de concentrados de cobres grises con el 14% de cobre y 1.560 g de plata/ tonelada de mineral. Tras sucesivas intermitencias en la actividad, relacionadas con variaciones de ley del mineral o irregularidades del filón, se llegó a una nueva reactivación de su laboreo en 1870, que habría llevado a una producción de 3.000 quintales métricos con 14,25% de Cu y 1.560 g de Ag/t.

Hasta el año 1890, y tras una primera época en la que la explotación fue superficial y en dirección (trincheras y socavones por encima del nivel freático), se pasó a considerar la explotación en zonas más profundas, pendiente del filón abajo. En 1850 ya se había instalado una fundición y una instalación de amalgamación, a unos 300 m al N de la mina. En 1889-90, la producción fue de 38 toneladas de cobres grises con 18% de Cu, parando la actividad en 1890.

En el último tercio del XIX, la explotación se dirigió al mineral más profundo, a favor de la pendiente del filón. Para ello se perforó un primer pozo de 14 m de profundidad junto al río Txangoa, lo que planteó problemas de inundación por estar a esa profundidad por debajo del nivel freático. Se hizo un nuevo pozo, poco antes del cierre de la mina en 1890, que alcanzó la profundidad de 54 m, a partir de la cual se hizo una galería en dirección, con una longitud de unos 150 m. En los niveles -18 m y -30 m, se abrían galerías a partir del pozo en direcciones opuestas. La mina se inundó tras su cierre en 1890.

- *Mina del Filón de los Alemanes*, en el término de Orbaiceta. Está situada a menos de 1 km hacia el SW de la mina de Txangoa. En ella se explotó una mineralización filoniana, cuya potencia variaba entre 0,8 y 1 m. La paragénesis es muy similar a la del filón de Txangoa, habiéndose reconocido la existencia de cobres grises, pirita, calcopirita, y de minerales supergénicos como malaquita, azurita y óxidos de hierro, en una ganga de cuarzo y siderita/ankerita. La explotación se atacó a través de una galería de 150 m de largo, que entronca con otra de al menos 30 m, y en cuya intersección hay un pozo vertical, actualmente inundado.

Este yacimiento fue explotado hasta 1786 por su propietario, el Vizconde de Echaux. La creación de la Fábrica de Armas de Orbaiceta obligó al abandono de la mina, tomando el relevo para la extracción del hierro la Fábrica de Armas, que indemnizaba a Echaux por el valor del mineral de cobre. En esta tentativa, la mineralización era atacada desde lo alto del Monte de Murukoa, con descenso progresivo de cota para la explotación del filón por niveles, con resultados positivos, puesto que la producción de mineral de hierro era suficiente para alimentar a la Fábrica de Orbaiceta (Trapote Redondo et al, 2010).

A nuestro entender, las galerías exploradas en la Mina de Txangoa Oeste tienen algo más de 100 años de antigüedad, desde el cese de su explotación, y las del Filón de Los Alemanes, una antigüedad mayor de 230 años, desde su cese. En ambos casos, aunque se explotó principalmente el mineral de cobre y algo de plata, los filones tenían importantes cantidades de minerales de hierro y de cuarzo, como es factible apreciar en la actualidad.

Ambas minas poseen numerosas filtraciones y pequeños arroyos recorren la mayor parte de sus galerías, siendo los caudales más abundantes en la Mina de Los Alemanes, en torno a 2 l/s en época de sequía. Las galerías en general tienen secciones en U invertida de 2 m de alto x 1,7 m de ancho, con algunas ampliaciones. La Mina de Txangoa sigue un trazado hacia el W, con tramos cortos perpendiculares (N-S) y posee una galería paralela a la principal, de 30 m, con un pozo inundado y una segunda boca abierta al exterior. El acceso por la boca principal es un pequeño derrumbe, descendente y de 3 m de anchura, al que sigue un escalón vertical de +3 m, fácil de escalar y que posee una cascada. Tras remontar el escalón, sigue una galería horizontal a ligeramente ascendente, por donde viene un pequeño hilo de agua. Su desarrollo total es de 220 m. Espaciadamente presenta rellenos de espeleotemas de oxi-hidróxidos de hierro (goethita y hematita) y pequeñas estalactitas de calcita. La ausencia de invertebrados es casi total (salvo algunos dípteros y araneidos), pero se observaron dos ejemplares distintos del murciélago pequeño de herradura *Rhinolophus hipposiderus* (Chiroptera: Rhinolophidae).

La Mina de los Alemanes constituye una cavidad surgente, con sus primeros 20 m inundados por un tramo lagunar con 40 cm de altura del agua y rellenos arcillosos en su fondo. Tras este tramo la galería es de trazado sinuoso hacia el W, horizontal a ligeramente ascendente, presentando primero suelos con coladas estalagmíticas y luego con rellenos arcillosos sobre la roca-caja. La profusión de espeleotemas es progresivamente mayor a medida que se avanza río arriba hacia su interior. Existen áreas profusamente recubiertas por coladas estalagmíticas y grandes estalactitas (de hasta 1 m) de intensos colores rojos y negros. A los 150 m intercepta una ampliación donde se encuentra el filón principal y existe a su vez un pozo vertical de sección cuadrangular inundado por agua. En este sector, además de espeleotemas de oxi-hidróxidos de hierro, hay pequeñas espeleotemas y flujos laminares verdes de malaquita y/u otros minerales de cobre. La galería sigue el filón 30 m más hacia el N, con un diámetro algo mayor, y donde la profusión y volumen de las espeleotemas de oxi-hidróxidos de hierro es enorme (más de 10 m³ de espeleotemas estimados para este tramo).



Figura 01. Valle del río Txangoa en la zona de minas y socavón colapsado de mina en su flanco Este.



Figura 02. Minas de Txangoa. Pequeña galería de mina en el flanco Este y sector inicial de la mina Txangoa Oeste, tras remontar un escalón de +3 m, con espeleotemas de oxi-hidróxidos de hierro.



Figura 03. Galería principal de la mina Txangoa Oeste, de 220 m de desarrollo, con un hilo de agua en su cauce.



Figura 04. Mina Txangoa Oeste. A medida que se profundiza van apareciendo espeleotemas de oxi-hidróxidos de hierro. Hay también pequeñas estalactitas de calcita.



Figura 05. Espeleotemas de goethita y hematita en la mina de Txangoa Oeste.



Figura 06. Espeleotemas de goethita y hematita, de colores rojos y negros, y espeleotemas ocre, con calcita y otros componentes, que probablemente incluyen sulfuros metálicos. Mina de Txangoa Oeste.



Figura 07. Arroyo de los Alemanes y entrada inundada a la Mina de los Alemanes.



Figura 08. Tramo inundado de entrada de la Mina de los Alemanes, donde se aprecian las pizarras de la roca-caja y pequeños recubrimientos de espeleotemas diversas (de calcita, pirita, calcopirita y pirrotina).



Figura 09. Diversidad de recubrimientos de espeleotemas y río subterráneo surgente, con coladas en su cauce.
Mina de los Alemanes, con galería ligeramente ascendente de 180 m de desarrollo.



Figura 10. Mina de los Alemanes. A medida que se avanza hacia el interior van apareciendo numerosas estalactitas y coladas de goethita y hematita, así como rellenos arcillosos de limonita en el cauce.

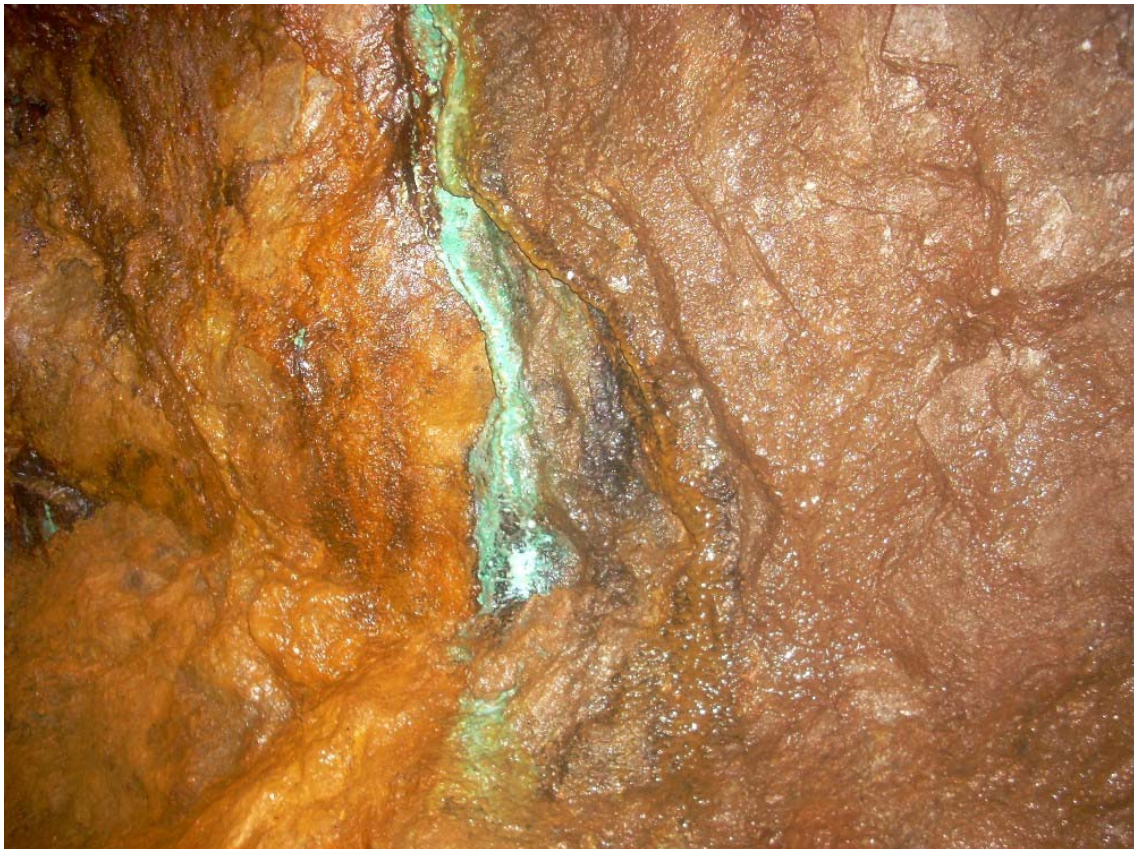


Figura 11. Espeleotemas verdes de malaquita, junto a oxi-hidróxidos de hierro, en la Mina de los Alemanes.



Figura 12. Gran profusión de grandes coladas, estalactitas y columnas de oxi-hidróxidos de hierro, en el tramo terminal de la Mina de los Alemanes. En este sector los efectos magnéticos son intensos.



Figura 13. Profusión de coladas parietales de goethita y hematita, y rellenos espesos de limonita, de consistencia blanda, revistiendo el suelo de la galería. Mina de los Alemanes.



Figura 14. Micelios flotantes de hongos en la Mina de los Alemanes, ejemplar de *Rhinolophus hipposideros* en la Mina de Txangoa, y detalles de espeleotemas de calcita de pequeño tamaño, en ambas minas.

Las espeleotemas recubren casi por completo paredes y suelos. No sólo hay grandes coladas, columnas, estalagmitas y estalactitas (de colores rojos, anaranjados y negros, de goethita-hematita), sino que todo el suelo posee rellenos espesos de arcillas anaranjadas finas y grandes gours en barrera (constituídos básicamente por limonita), escalonados a lo largo de la galería, en los que el explorador se hunde hasta la rodilla para poder avanzar.

Algunas de las espeleotemas negras y rojizas presentan en superficie brillos metálicos, con tonos negros muy intensos e incluso azulados, debidos a la presencia de magnetita y hematita. En otros casos, su aspecto es más fluido y coloidal, y seguramente contienen hidróxidos de hierro en forma de goethita y probablemente también trazas de hidróxidos de manganeso, que producirían los tonos negros más intensos. En algunos tramos los recubrimientos parietales y en el cauce tienen un espesor mayor de 50 cm y forman masas esponjosas y estalactitas en capas concéntricas, con un contenido interno arcilloso, poroso y húmedo, por lo que se disgregan con facilidad al presionarlas.

Llamó también nuestra atención la presencia de fuertes campos magnéticos en algunos puntos, que no sólo desviaban la aguja de la brújula sino que desenfocaban las imágenes fotográficas e incluso alteraron temporalmente la tarjeta de memoria de la cámara digital. Más de 40 fotos resultaron inutilizadas de este modo por efectos magnéticos. Atribuimos este efecto a la ocurrencia de magnetita y al alto contenido en hierro en las espeleotemas o en la roca-caja. El efecto era mayor en el filón del fondo de la Mina de los Alemanes, pero también se presentaba en otras partes de esta mina y de la Mina de Txangoa.

En proporción mucho menor, se encontraron pequeñas estalactitas y recubrimientos blancos, ocre y bronceados-dorados, en los que se identificó en laboratorio la ocurrencia de calcita, pirita, calcopirita y pirrotina (sulfuro de hierro II), este último también con leves efectos magnéticos.

En la Mina de los Alemanes no encontramos quirópteros y la presencia de invertebrados se reducía a algunos escasos ejemplares troglógenos de dípteros (Culicidae y Mycetophilidae), lepidópteros (Geometridae) y araneidos (Agelenidae), observados en zonas próximas a la boca de acceso. Otro detalle curioso resultó el hallazgo de tapices flotantes de micelios de hongos blancos en uno de los estanques de agua represados por un gours arcilloso de limonita.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los minerales secundarios hallados formando espeleotemas son principalmente oxi-hidróxidos de hierro, comunes en muchas mineralizaciones filonianas de hierro, a los que se agregan algunos otros componentes más raros, debidos al origen hidrotermal de los filones. A continuación agregamos algunos comentarios sobre sus características.

La hematita es un óxido férrico Fe_2O_3 . Forma espeleotemas rojizas, principalmente en forma de estalactitas y coladas. Tiene un color que varía de rojizo a negro, y un color de raya roja, que mancha la piel al tocarla. Con frecuencia contiene trazas de manganeso, aluminio y titanio. Es un polimorfo con la magnetita.

La goethita es un oxi-hidróxido de hierro (III). $\alpha\text{-FeO(OH)}$. Cristaliza en el sistema ortorrómbico pero su morfología puede ser muy variada. Puede contener hasta un 5% de manganeso. Su color también puede variar desde amarillento a rojizo, ocre y negro. En las cavidades estudiadas en este trabajo forma estalactitas, coladas estalagmíticas y flujos coloidales negros. Probablemente está presente en la composición de otras espeleotemas de oxi-hidróxidos de hierro.

La limonita $\text{FeO(OH).nH}_2\text{O}$ no es un verdadero mineral, sino una mezcla de óxidos e hidróxidos de hierro, que carece de cristales visibles y tiene color y raya pardo-amarilla. La limonita normalmente está compuesta de goethita, pero puede consistir también en proporciones variables de magnetita, hematita, goethita, etc. En estas minas se presenta como un material arcilloso, pero también forma parte de espeleotemas de colores anaranjados y amarillentos, en forma de coladas de consistencia blanda, en rellenos del cauce y grandes gours en barrera. Se origina por la descomposición de minerales de hierro, especialmente pirita.

La magnetita es un óxido de hierro II-III, habitualmente denominado óxido ferroso-férrico, $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$. Es un mineral ferromagnético, miembro del grupo del espinel. Su fórmula puede también ser escrita como $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, en la cual una parte es wüstita (FeO) y otra parte hematita (Fe_2O_3). Esto hace referencia a diferentes estados de oxidación del hierro en su estructura. Su color es negro a grisáceo, con brillo metálico, y su hábito cristalino es típicamente octaédrico, desde gránulos finos a masivo. Como mineral, junto con la hematita, es una de las más importantes menas, al contener hasta un 72% de hierro. Forma espeleotemas y recubrimientos cristalinos negros con cristallitos octaédricos.

Los oxi-hidróxidos de manganeso amorfos MnO(OH) forman recubrimientos y/o flujos coloidales de colores grises a negros. Las fases coloidales de óxidos de Mn pueden contener diversos minerales. Dado que los óxidos de Mn presentan dos estados de valencia (3+, 4+) la variedad de especies oxidadas es mayor que la de los óxidos de hierro, que sólo presentan el estado +3. En las minas de Txangoa pueden presentarse como fases hidratadas (birnessita, todorokita), como oxi-hidróxidos (manganita), así como óxidos en sentido estricto (pirolusita).

La malaquita es un dihidróxido de carbonato de cobre (II) $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$. Forma espeleotemas de color verde claro, en forma de recubrimientos delgados y flujos cristalinos. Otros ejemplos de color verde oscuro, probablemente corresponden al mismo mineral o a calcita coloreada por trazas de cobre. En todo caso su ocurrencia como espeleotema es muy escasa en estas minas.

Hemos citado también la presencia de pirrotina (sulfuro de hierro II, no estequiométrico), con un contenido variable de hierro: $\text{Fe}_{(1-2)}\text{S}$. La pirrotina se encuentra a menudo en filones de origen hidrotermal, junto a la pirita, marcasita y magnetita. Es llamada también pirita magnética porque su color es similar a la pirita y es débilmente magnética. Su magnetismo disminuye cuando disminuye el contenido en hierro. Tiene varios politipos de simetría cristalina hexagonal o monoclinica. Se encuentra en pequeñas espeleotemas y pequeños recubrimientos de tonos bronceados a marrones en la Mina de los Alemanes.

La ocurrencia de magnetita y pirrotina en espeleotemas es probablemente responsable de los efectos magnéticos detectados, principalmente en la Mina de los Alemanes, pero también en la de Txangoa. Estos minerales con propiedades ferromagnéticas pueden también estar presentes entre los componentes de la roca-caja de los filones.

La presencia de campos magnéticos en minas y yacimientos de hierro es ampliamente conocida y el magnetismo en la mayoría de las rocas es atribuido fundamentalmente a su contenido en magnetita (Adrian Bianchi, 2004; Evans & Heller, 2003; Johnson & Merrill, 1972; Thopson & Oldfield, 1986). La susceptibilidad magnética de las rocas depende fundamentalmente de su contenido en magnetita y pirrotina, y en menor proporción, de ilmenita (FeTiO_3) y otros minerales ferrimagnéticos como la titanomagnetita ($\text{Fe}(\text{Fe},\text{Ti})_2\text{O}_4$) y óxidos de fórmula general $x\text{OFe}_2\text{O}_3$, donde x puede ser ocupado por Mn, Co, Ni, Mg, Zn y Cd. El magnetismo de las rocas se debe así básicamente a su contenido en magnetita y a otros minerales del sistema ternario $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$. La ocurrencia de magnetismo en espeleotemas es mucho más rara (existen pocas referencias al respecto) y es atribuida generalmente también a la presencia de magnetita y óxidos de hierro (Lascau & Feinberg, 2011; Perkins, 1996). Los materiales magnéticos pueden también estar asociados a material detrítico transportado junto con las soluciones precipitantes (Bosh & White, 2004). El material detrítico resulta rápidamente encapsulado por capas sucesivas de acreción.

En la región de la Serra dos Carajás, Pará, Brasil (la mayor provincia mineral del planeta, con los mayores yacimientos de hierro) han sido halladas espeleotemas en cuevas con predominio de una matriz paramagnética de fosfato de hierro, procedente del suelo superior, junto a fracciones ferromagnéticas de baja coercitividad, que incluyen magnetita de fracción fina (monodominio) (Calandro et al., 2013). La ocurrencia de fosfato de hierro en estos suelos está asociada a la percolación de fluidos con pH bastante ácido, permitiendo así una disolución y reprecipitación del fosfato, que en el caso reportado para las espeleotemas va acompañada por la formación de pequeñas cantidades de óxidos, que incluyen magnetita.

En el magnetismo detectado pueden influir no sólo los minerales presentes en espeleotemas y en la roca-caja, sino incluso elementos detríticos aportados desde los suelos por las aguas de infiltración. Debido a la gran variedad de óxidos e hidróxidos de hierro y otros elementos metálicos en los filones hidrotermales de Txangoa, difícilmente podemos clamar que conocemos la causa exacta que genera los efectos magnéticos. Tampoco conocemos si ello contribuye a la precipitación de los grandes volúmenes de espeleotemas formadas en poco tiempo en estas minas (en comparación con otras minas de hierro exploradas previamente), ya que ello puede obedecer simplemente a la actividad hídrica local, una vez perforadas las galerías, y a la solubilidad de los distintos minerales contenidos en los filones. En todo caso, para nosotros constituye un aspecto novedoso y digno de mención, del que no hallamos reportes previos en la literatura espeleológica sobre minas y cuevas de la región.

La existencia de campos magnéticos tampoco parece ser un factor que afecte a la vida de los animales cavernícolas. De hecho la presencia de quirópteros en la mina de Txangoa es prueba de ello. Muchos vertebrados tienen magnetita en sus tejidos cerebrales y más bien ello proporciona una ayuda a sus mecanismos de orientación para sus desplazamientos migratorios y búsqueda de puntos de origen cuando son capturados y soltados en otro lugar, como está documentado para quirópteros, aves y otros vertebrados. Los invertebrados, que poseen múltiples receptores sensoriales, con mayor razón pueden no verse afectados.

La escasez de invertebrados cavernícolas en estas minas tal vez pueda atribuirse a las condiciones ambientales relativamente adversas que presentan, por el alto contenido en oxi-hidróxidos de Fe y otros metales. Al respecto, es conocida la elevada toxicidad que presentan en concentraciones altas el Al, Cd, Pb y otros metales pesados para los seres vivos (Bosnak & Morgan, 1981; Lewis, 1996; Nayak, 2002; Williams, 1999). Tanto el Al como el Fe incrementan su toxicidad cuando se presentan en soluciones acuosas en forma de hidróxidos y formando complejos con especies de bajo peso molecular y/o compuestos orgánicos (Nesse & Garbossa, 2001; Crichton et al., 2002), aunque el efecto tóxico depende mucho no sólo de la disponibilidad del metal sino de la identidad química de la especie reactiva y de la capacidad de otros ligandos para interferir en la hidratación de los iones metálicos (Harris et al., 1996). Estos efectos resultan mayores para invertebrados acuáticos (no observados en estas minas), pero también pueden afectar a la fauna terrestre (pocas especies, encontradas en bajo número y en la proximidad de las bocas).

La presente nota, fundamentalmente descriptiva, sólo pretende poner de relieve -de forma comparada- las inusuales características observadas en estas antiguas minas, a la vez que aportar información y posibles hipótesis para aproximarnos a la comprensión de los factores que han intervenido en su génesis y rasgos. Destaca de modo especial la inusual proliferación y considerable volumen de las espeleotemas de oxi-hidróxidos de hierro, pero también la ocurrencia de otras espeleotemas de malaquita, calcita y otros minerales secundarios. Así como la ocurrencia de campos magnéticos, muy probablemente debida a la presencia de magnetita, hierro y otros metales. Otro detalle inusual lo constituye la escasez de invertebrados cavernícolas, la presencia de quirópteros Rhinolophidae y la ocurrencia de tapices flotantes de hongos blancos en el medio acuático, bajo unas condiciones ambientales aparentemente adversas y extremas.

En resumen, una suma de detalles que consideramos de interés para la espeleología y la biología subterránea, y que aporta nuevos datos sobre las minas de cobre, galena argentífera y minerales de hierro en terrenos Paleozoicos del Norte de Navarra.

BIBLIOGRAFIA

- Adrian Bianchi, N. 2004. Estudio aeromagnético del Escudo de Guayana en la zona El Manteco, Norte del Estado Bolívar. Trab. Especial de Grado, Ingeniería Geofísica, Univ. Central de Venezuela, 148 pp.
- Bosch, R.F. & W.B. White. 2004. Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. Studies of cave sediments: Physical and Chemical Record of Paleoclimate. Springer, Dordrecht, Netherlands, 1-12.
- Bosnak, A. & E. Morgan. 1981. Acute toxicity of cadmium, zinc, and total residual chlorine to epigeal and hypogean isopods (Asellidae). The NSS Bulletin, 43: 12-18.
- Calandro, J.; P. Jaqueto; R. Trindade; I. Karmann & F. William da Cruz Jr. 2013. Magnetismo de espeleotemas de cavernas en formações ferríferas, Serra dos Carajás (Pará, Brasil). Latinmag Letters, 3, Special Issue: 1-6. Proceeding Montevideo, Uruguay.
- Crichton, R.; Wilmet, S.; Leggsyter, R. & R.J. Ward. 2002. Molecular and cellular mechanisms of iron homeostasis and toxicity in mammalian cells. Jour. Inorg. Chem., 91: 9-18.
- Evans, M. E. & F. Heller. 2003. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. Academic Press, San Diego, USA.
- Galán, C. 1993. Fauna Hipógea de Gipuzkoa: su ecología, biogeografía y evolución. Munibe (Ciencias Naturales), S.C.Aranzadi, 45 (número monográfico): 1-163. (Reedición digital en Publ. Dpto. Espeleología, S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF).
- Galán, C. 2003. Fauna cavernícola, hidrogeología y mineralogía de espeleotemas en una mina-cueva de Leiza, Navarra. Gobierno de Navarra, Dpto. Obras Públicas, Trans. y Com., Servicio de Proyectos, Pamplona, 26 pp. Reedit. pág. Web SC Aranzadi.
- Galán, C. 2003. Sima-Mina de Alzola (Gipuzkoa): hallazgo de un río subterráneo de leche de luna (mondmilch). Lapiaz, 30: 12-26.
- Galán, C. 2006. Fauna cavernícola y poblaciones bacteriales de la sima y río subterráneo de mondmilch de Alzola (Gipuzkoa). Laboratorio de Bioespeleología SCA. Publ. Dpto. Espeleología S.C.Aranzadi, Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 14 pp.
- Galán, C. 2017. Espeleotemas azules de hidrozincita y smithsonita en antiguas minas de galena argentífera (cuenca del río Urumea). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Publ. Dpto. Espeleología S.C.Aranzadi, Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 29 pp.
- Galán, C. & F.F. Herrera. 1998. Fauna cavernícola: ambiente, especiación y evolución (Cave fauna: environment, speciation and evolution). Bol. Soc.Venezol. Espeleol., 32: 13-43.
- Galán, C. & E. Leroy. 2003. Découverte d'un lac de lait de lune (mondmilch) dans le gouffre d'Alzola (Pays Basque, Espagne). Spelunca, FFS, 91: 21-26.
- Galán, C. & E. Leroy. 2005. Novedades sobre el río subterráneo de leche de luna (Mondmilch de gibbsita) de la sima-mina de Alzola (Determinaciones en MEB y microanálisis EDX). Bol. Sedeck, 6 (2006): 66-71.
- Galán, C. & M. Nieto. 2016. Nuevo hallazgo de espeleotemas de chrysocolla, malaquita y goethita-limonita en una antigua mina en pizarras Paleozoicas, en la cuenca del río Leizarán. Publ.Dpto.Espeleol. SC.Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 27 pp.
- Galán, C. & C. Vera Martin. 2009. Espeleotemas subacuáticos de yeso y gibsita en el río subterráneo de mondmilch de Alzola: caracterización química y estructural por microscopio electrónico de barrido (SEM), microscopio de fuerzas atómicas (AFM), espectroscopía por fotoelectrones de rayos X (XPS) y espectroscopía Raman. Publ. Dpto. Espeleología S.C.Aranzadi, Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 12 pp.
- Galán, C.; D. Peña & M. Nieto. 2004. Las minas de Anoeta y su fauna cavernícola asociada (macizo de Ernio, País Vasco). Publ. Dpto. Espeleología S.C.Aranzadi, Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 14 pp.
- Galán, C.; M. Nieto; I. Herraiz & A. Miner. 2016. Nuevos datos sobre antiguas minas de hierro en pizarras Paleozoicas: Merku 2 (cuenca del río Leizarán). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 38 pp.
- Galán, C.; J.M. Rivas & M. Nieto. 2012. Notas sobre espeleotemas, biología y paleontología de las minas y mesocavernas de Burusburu e Illaratu 2 (valle del Araxes, karst de Otsabio). Publ. Dpto. Espeleología S.C.Aranzadi, Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 20 pp.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2014. Minas y cuevas de Elama (Artikutza): Hidrogeología, fauna y evolución. Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 62 pp.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2014. Cuevas, simas, túneles y minas en caliza y esquistos Paleozoicos: cuenca de Artikutza. Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 38 pp.
- Galán, C.; J.M. Rivas & M. Nieto. 2017. Notas sobre la fauna cavernícola de la Mina Txindoki Norte (karst de Aralar, País Vasco). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 20 pp.
- Harris, W.; Berthon, G.; Day, J.P.; Exley, C.; Flaten, T; Forbes, W.; Kiss, T.; Orvig, C. & P. Zatta. 1996. Speciation of Aluminium in Biological Systems. J. Toxicol. Environ. Health, 48: 543-568.
- Hill, C. & P. Forti. 1997. Cave minerals of the world. National Speleological Society, 2da. Ed., USA, 463 pp.
- Johnson, H.P. & R.T.Merrill. 1972. Magnetic and mineralogical changes associated with low-temperature oxidation of magnetite. Journal of Geophysical Research: 77: 334-341.
- Lascu, I. & J.M. Feinberg. 2011. Speleothem magnetism. Quaternary Sci. Rev. 30, 3306-3320.
- Lewis, J. 1996. The devastation and recovery of caves and karst affected by industrialization. In: Rea, G. (Ed). Proc. 1995 National Cave Management Symposium, Indiana Karst Conservancy. pp: 214-227.
- Nayak, P. 2002. Aluminium: Impacts and Disease. Environ. Res., 89: 101-115.
- Nesse, A. & G. Garbossa. 2001. Aluminium toxicity in erythropoiesis. Mechanisms related to cellular dysfunction in Alzheimer's Disease. In: C. Exley Ed. Aluminium and Alzheimer's Disease. Elsevier, Amsterdam, cap.13: 261-278.
- Perkins, A. M., 1996. Observations under electron microscopy of magnetic minerals extracted from speleothems. Earth and Planetary Science Letters 139, 281-289.
- Thopson, R. & F. Oldfield. 1986. Environmental Magnetism. Allen and Unwin, London, UK.
- Trapote Redondo, M.; C. Marchán; J. Gómez de las Heras; M.T. López; J.C. Arranza; B. Martínez; J. Locutura; J. Rubio; E. Alberruche & C. Avilés. 2010. Minería en Navarra. D.G. Industria y Comercio; IGME Dir. Recursos Minerales y Geoambiente & EUI Técnica Minería y OP (UPV) Colaboración. Navarra, 211 p.
- Williams, R.J. 1999. What is wrong with aluminium. Jour. Inorg. Chem., 76: 81-88.