

**EXPLORACIÓN DE NUEVAS SIMAS-MINAS DE ZINC EN EL MONTE GAZUME
CON NOTAS SOBRE SU ESPELEOGÉNESIS Y ECOLOGÍA.**

Discovery and exploration of new chasms-zinc mines on Mount Gazume with notes on its speleogenesis and ecology.



Carlos GALÁN, Marian NIETO, Agustín GOZATEGI & Juliane FORSTNER.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

EXPLORACIÓN DE NUEVAS SIMAS-MINAS DE ZINC EN EL MONTE GAZUME CON NOTAS SOBRE SU ESPELEOGÉNESIS Y ECOLOGÍA.

Discovery and exploration of new chasms-zinc mines on Mount Gazume with notes on its speleogenesis and ecology.

Carlos GALÁN, Marian NIETO, Agustín GOZATEGI & Juliane FORSTNER.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Marzo 2023.

RESUMEN

Prospecciones efectuadas en varias zonas del flanco Sur del monte Gazume (Gipuzkoa, País Vasco) permitieron hallar nuevas cavidades. Estas se encuentran en las zonas de Ezurtza, Azulegi y Bordatxo. Se trata de antiguas minas que explotaron filones y vetas de minerales de zinc incluidos en un afloramiento de calizas arrecifales Urgonianas. Parte de las cavidades presenta rasgos naturales y otros artificiales, producto de la excavación minera en el contacto entre los filones de silicatos de zinc y la roca caliza encajante. Las cavidades poseen algunas especies de fauna cavernícola troglobia (pseudoscorpiones, coleópteros) y una inusual presencia de quirópteros. Se expone la exploración y topografía de tres cavidades de interés (una de ellas sima). Se discute la espeleogénesis y el papel que juegan las minas antiguas como refugio para invertebrados y quirópteros.

Palabras clave: Minas de zinc, Karst en caliza, Hidrogeología, Biología subterránea, Ecología, Fauna cavernícola.

ABSTRACT

Prospecting carried out in various areas of the southern flank of Mount Gazume (Gipuzkoa, Basque Country) made it possible to find new cavities. These are found in the areas of Ezurtza, Azulegi and Bordatxo. These are old mines that exploited lodes and veins of zinc minerals included in an outcrop of Urgonian reef limestone. Part of the cavities presents natural features and other artificial ones, product of the mining excavation in the contact between the veins of zinc silicates and the enclosing limestone rock. The cavities have some species of troglobite cave fauna (pseudoscorpions, beetles) and an unusual presence of bats. The exploration and topography of three cavities of interest (one of them a chasm) is exposed. Its speleogenesis and the role played by old mines as a refuge for invertebrates and bats are discussed.

Keywords: Zinc mines, Limestone karst, Hydrogeology, Subterranean biology, Ecology, Cave fauna.

INTRODUCCION

El monte Gazume (1.006 m de altitud) constituye un sinclinal volcado, continuación occidental del sinclinal de Ernio, de dirección NW-SE. En su flanco Sur afloran calizas del complejo Urgoniano (de edad Cretácico temprano, Aptiense-Albiense). El afloramiento abarca un área de 9 km² y comprende varias facies de calizas arrecifales y margas. Los tramos más compactos incluyen calizas micríticas con rudistas y calizas bioclásticas con abundantes fragmentos de corales.

Las calizas de este flanco Sur presentan bolsadas y vetas de silicatos de zinc, oxihidróxidos de hierro y materiales ferruginosos, intercalados en la serie caliza. Estos materiales fueron objeto de labores de minería de zinc, tanto a cielo abierto como a través de galerías subterráneas, hace 100-150 años. En el sector de Elkomen txiki exploramos en 2021 un conjunto de seis minas-simas que interceptan cavidades naturales, la mayor de ellas de 170 m de desarrollo de galerías y -48 m de desnivel (Galán et al, 2021a). Posteriormente, el mismo año, exploramos el sector de Azulegi, al W del primero, donde se localiza un extenso conjunto de antiguas minas y zanjones, obstruidas por derrumbe, encontrando una mina mayor (que intercepta también una cavidad natural (sima de -38 m), totalizando 620 m de desarrollo y -52 m de desnivel (Galán et al, 2021b). En 2023 seguimos explorando el flanco, en el sector de Bordatxo, encontrando otra mina que intercepta una sima de -80 m de desnivel (Galán et al, 2023). En todas estas cavidades encontramos fauna cavernícola y espeleotemas de interés.

Lo curioso de estos casos es que las minas interceptan en el endokarst cavidades naturales, sin comunicación previa con superficie. Algunas de ellas progresan hacia abajo y hacia arriba, hasta abrirse en superficie (hipótesis de los husos y simas fusiformes de Maucci) (Mangin, 1975; Maire, 1980; Galán et al, 2021a, 2023) y otras se escalonan en profundidad en el subsuelo.

Teniendo en cuenta que las minas y simas exploradas se localizan en zonas altas (a altitudes de 930 a 770 m snm, con el punto más bajo alcanzado a 690 m snm) y dado que la surgencia de Utzeta (que drena el acuífero Urgoniano) se localiza a una cota baja (de 230 m snm), existe un importante potencial para el hallazgo de cavidades en el endokarst a mayores profundidades.

Todo ello motivó seguir explorando el flanco Sur de Gazume, más al W y al S de los sectores explorados, con el objetivo de encontrar nuevas galerías, que permitieran la conexión con alguna de las anteriores o bien que prosiguieran con mayor desarrollo en la zona profunda del afloramiento calizo.

Las nuevas cavidades exploradas resultaron de modestas dimensiones, pero ofrecen interesantes indicios para proponer una hipótesis espeleogenética de conjunto sobre el karst local, y sobre la formación y desarrollo de cavidades en el interior del subsuelo a partir de los contactos entre los filones de silicatos de zinc y las calizas contiguas. También aportan información sobre el papel que juegan las galerías de mina (una vez cesada la actividad extractiva) como biotopo de refugio para diversas especies de invertebrados y quirópteros.

MATERIAL Y METODOS

En la exploración de las cavidades se utilizaron técnicas de espeleología vertical (cuerda estática, jumars, empotradores y friends). Los levantamientos topográficos fueron efectuados con instrumental de precisión Suunto. Los planos de las cavidades fueron dibujados en programa Freehand. Fueron efectuados muestreos biológicos en época invernal, mediante capturas directas. El material colectado fue preservado en etanol 75% y fue identificado en laboratorio bajo microscopio binocular Nikon. Fueron tomadas fotografías a fin de ilustrar los principales rasgos de las cavidades y su entorno.

RESULTADOS

La unidad de caliza Urgoniana en que se localizan las minas presenta filones y vetas de materiales ferruginosos y silicatos de zinc, que han sido objeto de explotación minera en distintas épocas, entre los años 1800's á 1907. Según la bibliografía minera, las principales minas explotadas en el flanco Sur de Gazume eran denominadas Coto minero de Régil o Minas de Azulegi y en ellas se explotaron bolsadas de calamina (óxidos de hierro y silicatos de zinc). El elemento de mayor valor era el zinc, muy bien cotizado en esa época porque con él se fabricaban muchos utensilios e instrumentos de latón (aleación de cobre y zinc). El término calamina era utilizado por los mineros para referirse a un conjunto de óxidos que contienen minerales de zinc en compleja asociación. Los minerales principales eran la hemimorfita (un hidroxil-silicato de zinc hidratado), la smithsonita (carbonato de zinc) y la hidrocincita (carbonato de zinc hidratado), que se encuentran en las partes altas de las minas de zinc. Los silicatos de zinc se presentan asociados a materiales ferruginosos (limonita), óxidos y sulfuros de hierro, formando lechos en caliza estratificada, en la zona de oxidación de sulfuros metálicos. El buzamiento de la caliza es en general poco discernible, de 30-40° SSE.

En el flanco S de Gazume hay muchas minas y restos de ellas distribuidas por todo el flanco. La mayor concentración de minas se encuentra en los sectores de Elkomen txiki (situado a 950 m al W del collado de Zelatun) y en el de Azulegi (a 600-800 m al W del anterior); el sector de Bordatxo se encuentra algo más al S que el de Elkomen txiki y más bajo. Las cavidades que encontramos y exploramos en esta ocasión se localizan en los sectores de Bordatxo, parte más occidental de Azulegi (a 1.800 m al W de Zelatun) y en el sector de Ezurtza (a 500 m al W de Azulegi W y a 2.280 m de distancia a Zelatun). Describiremos primero las cavidades exploradas y luego analizaremos sus características más destacables (tanto geológicas como biológicas). Un análisis de conjunto de las minas y simas halladas en Gazume Sur será efectuado en el apartado de Discusión.

DESCRIPCIÓN DE CAVIDADES

Mina-sima Bordatxo 02.

Situación: A 920 m al W del collado de Zelatun y a 30 m al E de la mina-sima Bordatxo 01. Monte Gazume.

Coordenadas ETRS89, UTM30N: E 567.410; N 4.780.690; altitud 770 m snm

Término municipal: Errezil. Plano en Figura 01. Imágenes de la cavidad y su entorno en Figuras 02 á 11.

Dimensiones: Desarrollo 22 m. Desnivel -15 m.

Descripción: La boca se abre en la ladera inclinada del monte, al lado de una pequeña explanación de un camino forestal., a 30 m al E de la mina-sima Bordatxo 01 (Galán et al, 2023) y a similar altitud.

Se trata de una pequeña boca (de 40 cm de diámetro) colgada semi-oculta a +2 m de altura sobre un talud en el fondo de la explanada. Daba la impresión de que se trataba de una mina (como Bordatxo 01) cuya entrada se había derrumbado, dejando sólo una pequeña oquedad superior. Pero en realidad es una sima natural que se desarrolla a expensas de una fractura vertical. Tal vez se interceptó al excavar la explanación y se sacó algo de material en la entrada, pero todo su desarrollo interno es natural.

La pequeña boca da paso a una sima de -8 m de forma acampanada, que se amplía a 2-3 m de diámetro. La base inclinada del pozo sigue en rampa pronunciada hasta la cota -12 m. En este punto la galería se estrecha a 1 m de ancho pero siguiendo una alta fractura vertical, que presenta varios bloques acuñaos entre sus paredes. Puede seguirse por encima de los bloques con otro tramo vertical de -3 m o bien pasar a través de una gatera bajo los bloques acuñaos. Se alcanza una leve ampliación (cota -15 m) donde la cavidad presenta una chimenea (de unos 7 m de altura) con algunas espeleotemas. La base describe un codo y se cierra en cul de sac, con un sumidero en su fondo colmatado de sedimentos arcillosos.

Todo el suelo de la cavidad es un relleno de sedimentos arcillosos y pequeños bloques. Las paredes presentan algunas costras de estalagmitas, de calcita y de hemimorfita. En la parte baja encontramos un ejemplar hibernante del murciélago grande de herradura *Rhinolophus ferrumequinum*. En el suelo son abundantes caracoles vivos y conchas de la especie *Cepaea nemoralis*, y en las paredes araneidos Tetragnathidae y Agelenidae, dípteros y algunos lepidópteros *Triphosa dubitata* (Geometridae). En el fondo de la cavidad encontramos ejemplares de dos especies troglóbias: el pseudoescorpión *Neobisium (Blothrhus) vasconicum* Nonidez (Neobisiidae) y el coleóptero *Speocharidius breuilli* Bolívar (Leptodirinae, antes Bathysciinae), ya reportados previamente para otras minas-simas del flanco Sur de Gazume (Galán et al, 2021a, 2021b, 2023).

Mina de Azulegi W.

Situación: A 1.788 m al WNW del collado de Zelatun. Extremo occidental del sector de Azulegi. Monte Gazume.

Coordenadas ETRS89, UTM30N: E 566.580; N 4.781.040; altitud 858 m snm.

Término municipal: Errezil. Plano en Figura 01. Imágenes de la cavidad en Figuras 12-17.

Dimensiones: Desarrollo 20 m. Desnivel -7 m.

Descripción: La boca se localiza a unos 300 m al W del conjunto o concentración mayor de las minas de Azulegi (Galán et al, 2021), en el borde SW de un prado característico con montículos de bloques de piedra con forma de iglús, de 2 m de alto cada uno. La boca se abre en la base de una pequeña pared de caliza donde se inicia el lapiaz, en el límite entre el prado y la zona boscosa de hayedo.

La boca, de 1 m de diámetro, se amplía en galería descendente, con suelo de hojarasca, que lleva a una bifurcación. La rama izquierda es una galería de 2 m de diámetro que desciende con fuerte pendiente hasta la cota -7 m, donde se cierra y posee una charca de agua (punto bajo de la cavidad). Las paredes presentan algunas coladas estalagmíticas, de hemimorfita, hidrocincita y calcita. A lo largo de la galería, a distintas alturas, encontramos hasta cinco ejemplares hibernantes del murciélago pequeño de herradura *Rhinolophus hipposideros*.

La rama derecha va en horizontal, teniendo por techo un estrato resistente y suelo de bloques. Se alcanza un laminador de escasa altura tras el cual la galería sigue descendente, pero se torna impracticable por su estrechez y la ocurrencia de bloques sueltos. Su bóveda y paredes presentan rasgos naturales mientras que los bloques son producto de la excavación minera y rotura de la caliza. La fauna observada incluye caracoles, araneidos, dípteros y lepidópteros, comunes en las minas cercanas de Azulegi, así como ejemplares del coleóptero troglóbico *Speocharidius breuilli* Bolívar (Leptodirinae). La cavidad es una mina-cueva (forma mixta) de 20 m de desarrollo y -7 m de desnivel.

Cabe también mencionar que los montículos de piedra del prado externo adyacente son acumulaciones artificiales del material extraído de las minas a cielo abierto y zanjones cercanos, acumulados de esa curiosa forma.

Minas de Ezurtza.

Situación: A 2.280 m al WNW del collado de Zelatun. A 450 m al W de la mina de Azulegi W. Monte Gazume.

Coordenadas ETRS89, UTM30N: E 566.066; N 4.781.051; altitud 765 m snm.

Término municipal: Errezil. Plano en Figura 01. Imágenes de la cavidad en Figuras 18 a 22.

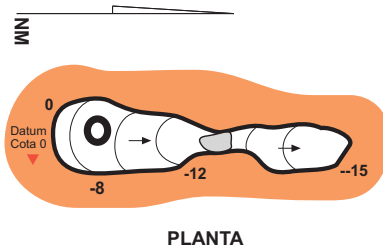
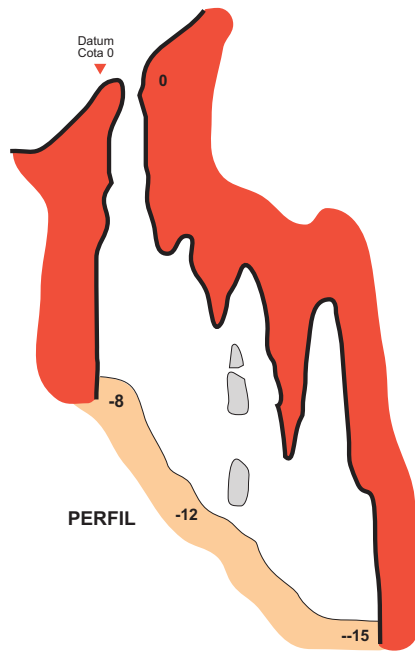
Dimensiones: Desarrollo 12 m. Desnivel -4 m.

Descripción: El sector de Ezurtza se localiza 500 m al W de la cavidad anterior y 100 m de altitud más bajo. Consta de varias depresiones y zanjones mineros, excavados a cielo abierto, y pequeñas minas. La más importante de ellas se encuentra en el fondo de la depresión mayor (Ezurtza 01). Su boca tiene 2 m de diámetro y da paso a una galería rectilínea, primero descendente y luego horizontal, de 12 m de largo. Finaliza en cul de sac en la cota -4, al cesar la excavación. La mina intercepta dos mesocavernas naturales, con algunas espeleotemas, y en la galería principal encontramos un ejemplar de quiróptero *Rhinolophus ferrumequinum*.

Esta cavidad forma parte de un grupo de tres depresiones: la más grande, con la mina descrita; al lado, otro zanjón, con una excavación-mina de apenas 1 m, cerrada en cul de sac; y un poco más alta, otra depresión-zanjón, con una excavación de escasos 2 m siguiendo una fractura natural. A 30 m de distancia al NW y algo más alto hay otro zanjón, de 5 m de largo, en cuyo fondo se abre una estrecha sima-mina; presenta una vertical de -2 m, destrepable en escalada, una corta rampa descendente y una segunda vertical de tal vez -4 m siguiendo una estrecha grieta, no explorada porque parece cerrarse.

En el sector se aprecia que se explotaron varias mineralizaciones a cielo abierto y el grupo de zanjones y minas descrito. La mina mayor (Ezurtza 01) posee en parte de su galería rasgos naturales, con mesocavernas interceptadas por la mina.

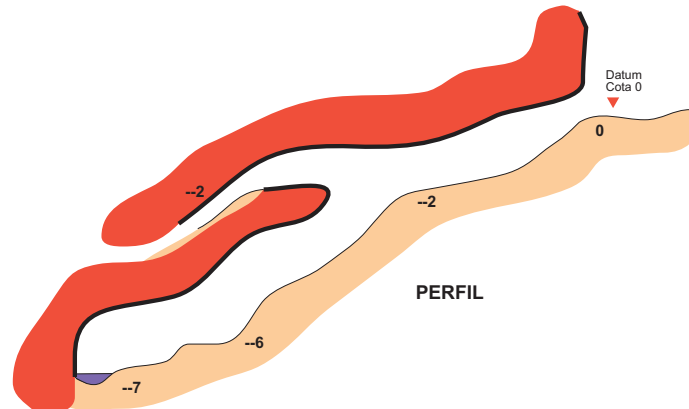
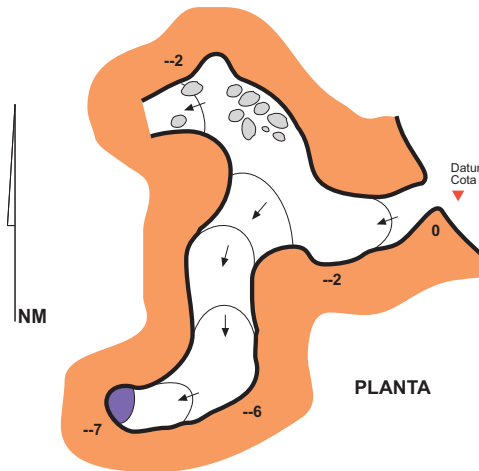
Figura 01. Plano de las cavidades.



Mina-sima Bordatxo 02



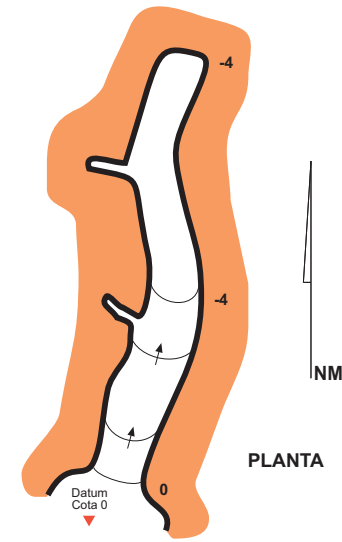
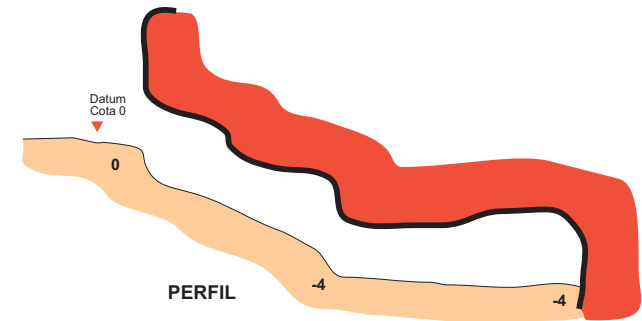
Coordenadas ETRS6, UTM 30N:
N 4.780.690; E 567.410; Altitud: 770 m snm.
Dimensiones: Desarrollo 22 m. Desnivel -15 m.
Topografía: C.Galán, A.Gozategi, J.Forstner & M.Nieto. 2023.
Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C. Aranzadi.



Mina de Azulegi W



Coordenadas ETRS6, UTM 30N:
N 4.781.040; E 566.580; Altitud: 858 m snm.
Dimensiones: Desarrollo 20 m. Desnivel -7 m.
Topografía: C.Galán, A.Gozategi, J.Forstner & M.Nieto. 2023.
Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C. Aranzadi.



Mina de Ezurtza 01



Coordenadas ETRS6, UTM 30N:
N 4.781.051; E 566.066; Altitud: 765 m snm.
Dimensiones: Desarrollo 12 m. Desnivel -4 m.
Topografía: C.Galán, A.Gozategi, J.Forstner & M.Nieto. 2023.
Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C. Aranzadi.



Figura 02. Exploraciones en época invernal en el flanco Sur de Gazume. Parte del equipo en el collado de Zelatun (entre Ernio y Gazume) (arriba) y en la entrada de la mina-sima Bordatxo 01 (debajo).



Figura 03. Alcanzando la boca y preparando material y equipos para explorar la mina-sima Bordatxo 02 (flecha roja).



Figura 04. Instalando la cuerda para descender a la cima Bordatxo 02, tras despejar de zarzas la pequeña boca.



Figura 05. La boca de Bordatxo 02 da paso a una sima acampanada que se amplía y desciende hasta la cota -12 m.

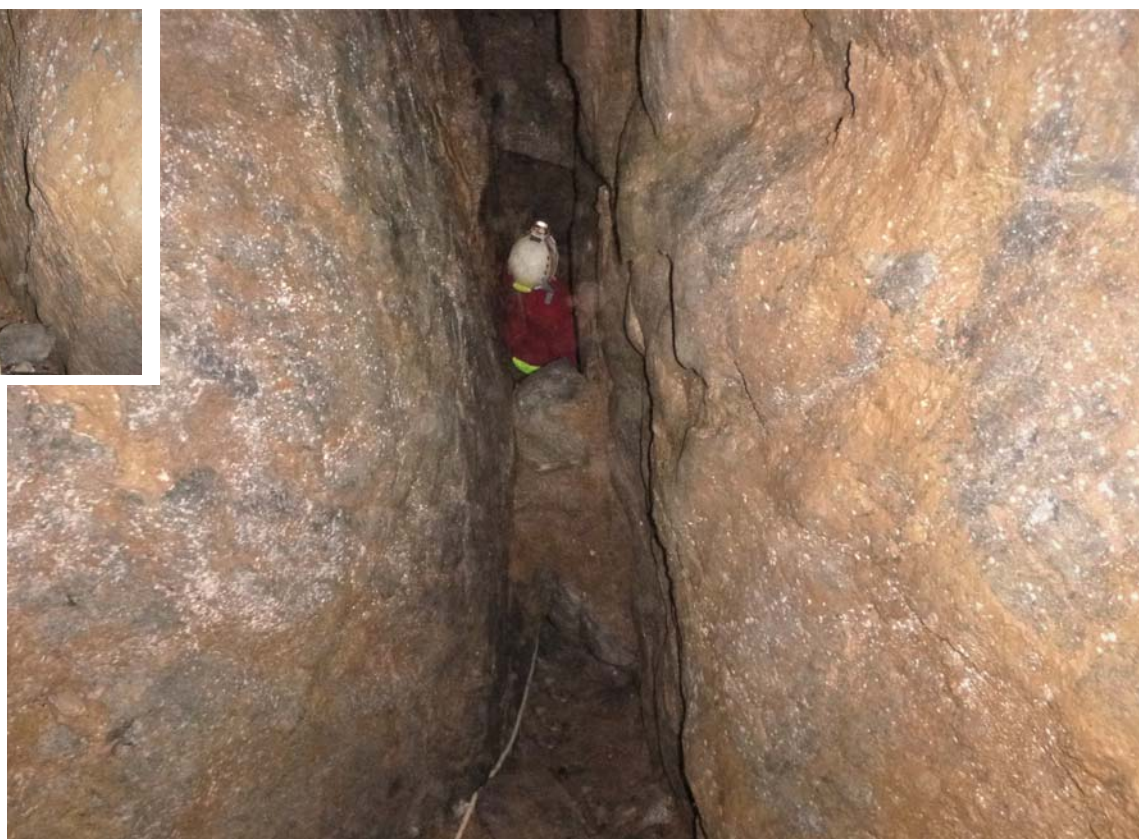


Figura 06. En la cota -12 m la cavidad sigue una alta diaclasa vertical, con bloques acuñaados, que tras pasar una gatera descendente bajo un gran bloque permite alcanzar una ampliación en la cota -15 m. Sima Bordatxo 02.



Figura 07. Diversos aspectos de la sima Bordatxo 02 y detalle de un ejemplar de *Rhinolophus ferrumequinum*.



Figura 08. Saliendo del paso estrecho e inicio del ascenso de la vertical de 12 m de la sima Bordatxo 02.



Figura 09. Vista hacia el fondo y ascenso en jumars de la sima Bordatxo 02.



Figura 10. Secuencia del ascenso en jumars de la sima Bordatxo 02.



Figura 11. Desequipando la sima Bordatxo 02 tras su exploración y topografía y en ruta hacia el sector de Atxulegi.



Figura 12. Zona con lapiaz y dolinas al lado del prado con montículos de roca en el extremo W del sector de Atxulegi. La mina-cueva de Atxulegi W (o Atxulegi 02) se localiza en el inicio del bosque en la parte SW del prado (flecha roja).



Figura 13. Pequeña boca de la cueva-mina Azulegi W ó Azulegi 02.



Figura 14. Entrada descendente y bifurcación en la mina-cueva Azulegi W.



Figura 15. Galería descendente izquierda de Azulegi W, con charca de agua terminal (cota -7 m) y ejemplares del murciélago pequeño de herradura *Rhinolophus hipposideros* (Rhinolophidae).

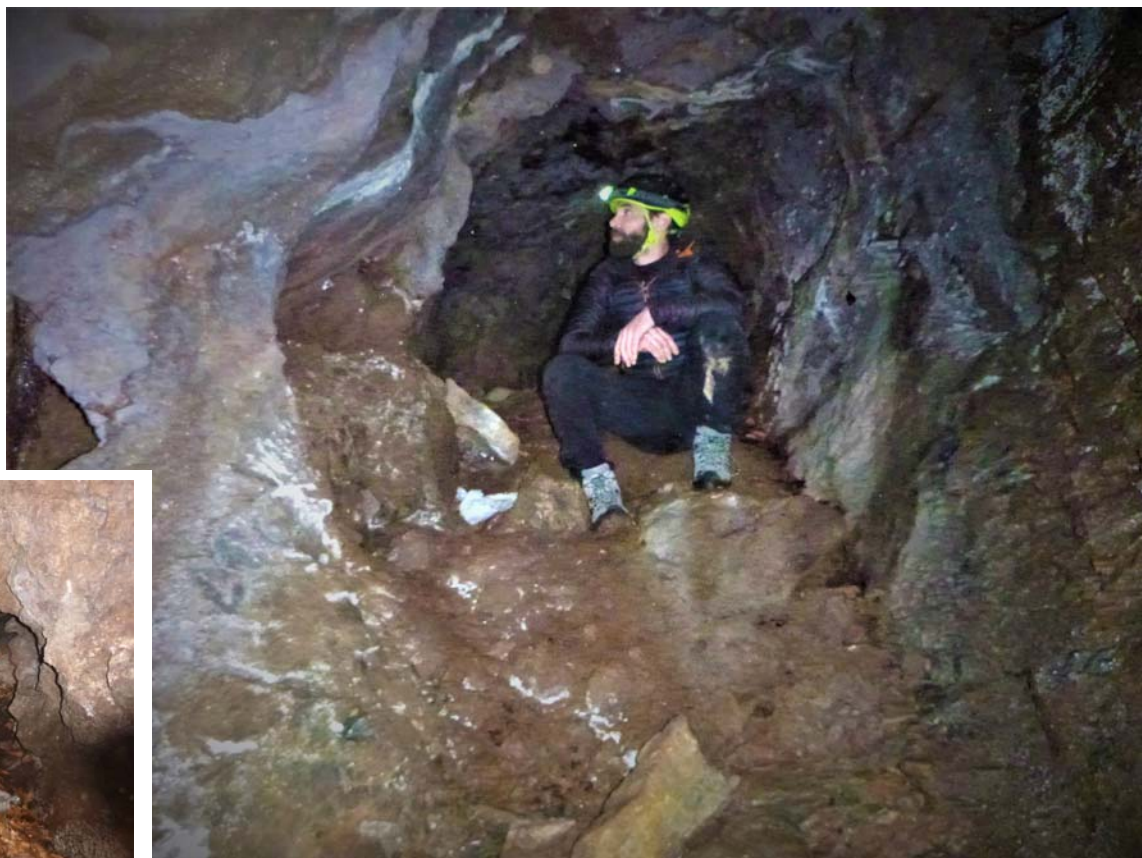


Figura 16. Galería descendente W de Azulegi W, con algunas espeleotemas y ejemplares de quirópteros *Rhinolophus hipposideros* (Vespertilionidae).



Figura 17. Continuación horizontal y galería derecha con laminador bajo estrato de caliza, con continuación estrecha descendente y suelo de bloques inestables. Mina-cueva Azulegi W.



Figura 18. Sector de Ezurtza, con varias depresiones excavadas a cielo abierto, y boca de la mina-cueva Ezurtza 01.



Figura 19. Mina-cueva Ezurtza 01. Detalles de la roca-caja, con fractura en el techo, y bloques deprendidos.



Figura 20. Fondo en cul de sac de la mina-cueva Ezurtza 01 (arriba) y mesocaverna natural interceptada por la mina, con pequeño flujo de agua hacia la galería de mina (debajo).



Figura 21. Otras cavidades en la zona de Ezurtza, al W del sector de Azulegi. Mina Ezurtza 02, de escasos 2 m finalizada en cul de sac (imágenes grandes), y mina 03, con un zanjón que profundiza en grieta (recuadro).



Figura 22. Mina-sima Ezurtza 04., al NW y algo más arriba que el grupo anterior de minas. Consta de un zanjón que finaliza en sima de -2 m de boca pequeña, destrepable en escalada, y prosigue en rampa y sima interior estrecha.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tras la exploración de las tres minas descritas volvimos a visitar la mina Azulegi 01, de 620 m de desarrollo (Galán et al, 2021b), y en ella llamó también nuestra atención la presencia de murciélagos *Rhinolophus hipposideros* hibernantes (en número de más de 8 ejemplares en los primeros 250 m de galerías) así como de ejemplares de pseudoescorpiones troglobios *Neobisium (Blothrus) vasconicum* (Neobisiidae).

Las dos especies troglobias citadas son formas relictas de una antigua fauna cálida de tipo tropical que habitó en el continente Europeo durante el Terciario. Y ambas son especies endémicas de Gipuzkoa (Galán, 1993; Zaragoza & Galán, 2007). Por lo que se trata de especies de gran interés biogeográfico y evolutivo (Galán, 1993; Ginet & Juberthie, 1988; Vandel, 1964). Su presencia en minas-simas de la región indica que existe toda una red de cavidades naturales en el endokarst de Gazume, sólo parcialmente puesta de manifiesto por la excavación de galerías de mina, las cuales han interceptado cuevas y mesocavernas naturales, ocultas, sin comunicación previa con superficie.

También llama la atención la frecuentación y utilización de las galerías de mina por quirópteros. En el conjunto de cavidades del flanco Sur de Gazume hallamos numerosos ejemplares de dos especies de *Rhinolophus* (Rhinolophidae) y un ejemplar hibernante de *Eptesicus serotinus* (Vespertilionidae), especie esta raramente encontrada en cuevas y extraordinariamente infrecuente en el País Vasco en período invernal (Galán et al, 2023). La actividad minera en el país y la gran cantidad existente de minas abandonadas (que cesaron su actividad extractiva hace 100 o más años), constituyen nuevos hábitats hipógeos (de reciente creación) que no sólo pueden estar en comunicación con redes de fisuras y cavidades subterráneas, sino que amplían los espacios hipógeos susceptibles de ser habitados por invertebrados cavernícolas y quirópteros, entre otras especies.

Pero tal vez lo más curioso que ha revelado la exploración de este conjunto de antiguas minas, es la existencia en el endokarst de importantes volúmenes de vacíos y cavidades subterráneas, sin comunicación previa con superficie (a nivel de macrocavernas accesibles para el ser humano) pero sí recorridas por el aire y el agua de infiltración y habitados por fauna cavernícola.

En las minas exploradas y descritas en este trabajo (y en las anteriores minas de zinc exploradas en Gazume), se aprecia que en muchos casos las cavidades tienen en parte rasgos artificiales y en parte naturales. En muchos casos la perforación de galerías de mina intercepta simas fusiformes verticales, formadas a expensas de fracturas verticales, según el mecanismo de erosión inversa expuesto en el modelo genético de Maucci (Maucci, 1952). Según este autor es frecuente la formación de cavidades en el subsuelo a partir de fisuras verticales, donde la infiltración difusa y lenta en la base de la zona epikárstica produce una erosión inversa sobre las paredes, ampliando los conductos hacia abajo y hacia arriba, los cuales pueden evolucionar hasta abrirse a superficie. Muchos de estos pozos de disolución, sin continuidad horizontal, adoptan forma de husos y terminan cegados en profundidad por colapso de bloques y/o rellenos de arcillas de descalcificación (Maire, 1980; Mangin, 1975).

En el flanco Sur de Gazume encontramos ejemplos de este tipo (por ejemplo las simas de Bordatxo 01 y 02, o la sima interna de la mina Azulegi 01); también se da el caso de que la cavidad sea de forma oblicua y se haya formado a expensas de planos de estratificación (ejemplos parciales lo proporcionan la mina de Azulegi W y otras minas-simas en Elkomen txiki). Pero la labor minera pone de manifiesto otro hecho: al seguir los filones de silicatos de zinc, excava contactos con la caliza, donde se encuentran cavidades naturales formadas precisamente en los contactos filón-caliza y no sólo en fracturas de la caliza. Es decir que en este caso la espeleogénesis de cavidades de erosión inversa se da preferentemente al interceptar la infiltración vertical los contactos de la caliza con vetas y filones de silicatos de zinc y materiales ferruginosos. Estas vetas metalíferas son además ricas en sulfuros.

La gran mayoría de las mineralizaciones de hierro incluidas en calizas Urganianas en el País Vasco se han producido por el ascenso de soluciones hidrotermales cuando las calizas estaban ya sedimentadas y compactadas, pero no deformadas por las fases compresivas Alpinas. Estas soluciones hidrotermales, capaces de transportar cationes disueltos, se introdujeron a favor de las fracturas y planos de estratificación de la caliza, produciendo el reemplazamiento del catión Ca^{2+} por el catión Fe^{2+} (formando siderita y ankerita) y otros metales asociados, como la hemimorfita (silicato de zinc) y la smithsonita (carbonato de zinc). La mayor parte de los filones con mineralizaciones representan el relleno de las propias fracturas por las que ascendieron los fluidos hidrotermales. Posteriormente, durante el proceso de plegamiento, y asociado al ascenso y erosión de los sedimentos suprayacentes, las rocas mineralizadas entraron en contacto con el oxígeno ambiental provocando alteración en las zonas superficiales, lo que generó la transformación de los minerales carbonatados (siderita principalmente), en óxidos e hidróxidos de hierro (hematita, goethita y limonita), así como los hidroxisilicatos y carbonatos de zinc. Las calizas en que se encuentran las mineralizaciones de hierro y zinc están por lo general altamente karstificadas. La concentración de sulfuros asociados a estos minerales es alta (siendo común la presencia de pirita y/o sus productos de alteración) y con el tiempo y el agua el azufre puede generar ácido sulfúrico tomando las aguas más agresivas y facilitando la disolución de volúmenes mayores de roca caliza, con la consiguiente formación de vacíos y cavidades en el endokarst.

La oxidación de los sulfuros metálicos en la naturaleza es un proceso complejo, que incluye varios tipos de reacciones (de óxido-reducción, hidrólisis, formación de complejos iónicos, solución-precipitación); de su conjunto se origina alguna forma oxidada de hierro, aniones sulfato y una fuerte acidez, con un valor medio estimado entre 1,2 y 2 moles de ácido por mol de pirita. Durante todo el proceso de oxidación de la pirita la producción de ácido es continua, variando su cantidad según el grado de oxidación del hierro, el mecanismo de oxidación y los productos resultantes de la reacción (Bruynesteyn & Hackl, 1984).

En la naturaleza realmente tiene lugar una combinación de reacciones, en las que incluso puede estar presente la intervención de bacterias. Por otro lado, la fuerte tendencia que presenta el ión férrico a hidrolizarse y precipitar favorece estos procesos, siendo la oxidación de la pirita una de las reacciones de meteorización más acidificantes (Stumm & Morgan, 1981).

La oxidación bacteriana puede ser el mecanismo de oxidación más importante en todo el rango de pH de las aguas naturales. Las principales poblaciones microbianas son bacterias quimiolitotróficas acidófilas del grupo *Thiobacillus*, aunque también pueden contribuir otros grupos (*Metallogenium*, *Sulfolobus*) (Ralph, 1979). En función de las condiciones físico-químicas, especialmente pH y Eh, parece existir una sucesión de bacterias oxidantes del Fe (Walsh & y Mitchell, 1972a, 1972b; Ralph, 1979). En el rango de pH 6-9 se ha aislado en adición otras bacterias, como *Sphaerotilus natans* y *Gallionella ferruginea* (Ralph, 1979), aunque en este rango de pH la oxidación inorgánica es relativamente alta y la intervención bacteriana no está aún clara. Según Walsh & Mitchell (1972a, 1972b) el miembro terminal de las sucesiones pH-dependientes de las bacterias oxidantes, tanto del S como del Fe, es el *Thiobacillus ferrooxidans*, que parece controlar los procesos de oxidación en medios ácidos y oxidantes. Esta bacteria precisa para la oxidación del Fe un medio acuoso (aunque toma el oxígeno y el CO₂ del aire), una fuente de amonio, y pequeñas cantidades de otros elementos (fosfato, calcio, magnesio), generalmente ya presentes en el agua (Bruynesteyn & Hackl, 1984), así como altas concentraciones de iones sulfato. Su crecimiento puede producirse en la zona superficial, aunque parece posible su existencia en profundidad (Kleinmann, 1979; Kleinmann & Crerar, 1979). Por otra parte *Thiobacillus* es capaz de soportar altas concentraciones de Zn y Mn, entre otros metales.

Nuestras observaciones en las minas-simas exploradas en Gazume sugieren una hipótesis genética que combina el modelo de erosión inversa de Maucci, con el desarrollo de cavidades por aguas más agresivas (debido a la presencia de sulfuros en las vetas metalíferas), al interceptar la infiltración vertical los contactos entre las vetas y la caliza adyacente, y esto puede ocurrir tanto sobre líneas de fractura como sobre planos de estratificación. Su resultado será una proliferación de vacíos en el endokarst, que luego evolucionan hacia la formación de macrocavernas y que pueden progresar por el mecanismo de erosión inversa hasta abrirse en la superficie.

Los resultados obtenidos agregan nuevos datos sobre la espeleogénesis en calizas que contienen filones de hemimorfita. A la vez amplían el conocimiento sobre la fauna que habita en el karst de Gipuzkoa, su biología y ecología.

AGRADECIMIENTOS

A los miembros del Dpto. de Espeleología de la Sociedad de Ciencias Aranzadi (SCA) que nos acompañaron en prospecciones previas en el monte Gazume, en especial a Iñigo Herraiz. A tres revisores anónimos de la SCA y Biosphere Consultancies (Reino Unido) por la revisión crítica del manuscrito y sus útiles sugerencias.

BIBLIOGRAFIA

- Bruynesteyn, A. & R. Hackl. 1984. Evaluation of acid production potential of mining waste materials. *Minerals and the Environment*, 4: 5-8.
- Galán, C. 1993. Fauna Hipógea de Gipuzkoa: su ecología, biogeografía y evolución. *Munibe (Ciencias Naturales)*, S.C.Aranzadi, 45 (número monográfico): 1-163.
- Galán, C.; M. Nieto; I. Herraiz & A. García. 2021a. Simas y minas de Elkomen txiki (monte Gazume): hidrogeología y fauna cavernícola. Publ. Dpto. Espeleo. S.C.Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF, 30 pp.
- Galán, C.; M. Nieto & I. Herraiz. 2021b. Notas geo-biológicas sobre las minas de zinc de Azulegi (Coto minero de Régil). Publ. Dpto. Espeleo. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF, 32 pp.
- Galán, C.; M. Nieto; A. Gozategi & J. Forstner. 2023. Exploración y Biología subterránea de una antigua mina de zinc en el monte Gazume (Mina Bordatxo) y notas sobre su peculiar Ecología. Publ. Dpto. Espeleo. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF, 35 pp.
- Ginet, R. & C. Juberthie. 1988. Le peuplement animal des karsts de France. Deuxième partie: éléments de biogéographie pour les invertébrés terrestres. *Karstologia*, 11-12: 61-71.
- Kleinmann, R. 1979. The biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. Ph. D. Thesis. Princeton Univ. Princeton.
- Kleinmann, R. & D. Crerar. 1979. *Thiobacillus ferrooxidans* and the formation of acidity in simulated coal mine environments. *Geomicrobial. Journ.*, 1: 373-388.
- Maire, R. 1980. *Eléments de karstologie physique*. Spelunca, FFS. 1980 - N° 1, Suppl.: 1-56.
- Maucci, W. 1952. L'ipotesi del l'erosione inversa come contributo allo studio della speleogenesi. *Boll.Soc.Adriatica Sc.Nat.*, 46: 1-60.
- Mangin, A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse d'Etat, *Annales de Spéléologie*: 29(3): 283-332; 29(4): 495-601; 30(1): 21-124; C.N.R.S., Paris.
- Ralph, B. J. 1979. Oxidative reactions in the sulfur cycle. In: Trudinger, P. & D. Swaine (Eds). *Biochemical cycling of mineral-forming elements*. Elsevier. 6 (3): 369-400.
- Stumm, W. & J. Morgan. 1981. *Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters*. Wiley-Interscience. London.
- Vandel, A. 1964. *Biospéologie: La Biologie des Animaux cavernicoles*. Ed.Gauthier-Villars, Paris, 619 p.
- Walsh, F. & R. Mitchell. 1972a. An acid-tolerant iron-oxidizing *Metallogenium*. *Journ. Gen. Microbiol.* 72: 369-376.
- Walsh, F. & R. Mitchell. 1972b. A pH-dependent succession of iron bacteria. *Environ. Sci. Technol.*, 6: 809-812.
- Zaragoza, J. & C. Galán. 2007. Pseudoescorpiones cavernícolas de Gipuzkoa y zonas próximas. Publ. Dpto. Espeleo. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF, 14 pp. Reeditado en: *Lapiaz, Fed.Valenc.Espeleol.*, 31: 1-14 .