

CUEVAS EN ARCILLA EN EL BARRANCO NORTE DE LA NASA (BARDENA NEGRA).

Caves in clay in the North gully of La Nasa (Black Bardena).



Carlos GALÁN; Daniel ARRIETA; Marian NIETO & Juliane FORSTNER.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi. Septiembre 2016.

CUEVAS EN ARCILLA EN EL BARRANCO NORTE DE LA NASA (BARDENA NEGRA).

Caves in clay in the North gully of La Nasa (Black Bardena).

Carlos GALÁN; Daniel ARRIETA; Marian NIETO & Juliane FORSTNER.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Septiembre 2016.

RESUMEN

Se describen nuevos ejemplos de cuevas y simas en arcilla, descubiertos en un sector de la Bardena Negra denominado Barranco Norte de La Nasa. La región es árida a semidesértica y está situada en el Sur de Navarra. En ella se desarrollan importantes sistemas de cavidades en arcillas de la Formación Tudela, de edad Mioceno (Terciario). Las cavidades se han formado por procesos de tubificación o piping en arcillas dispersivas ricas en sales de sodio. En menor proporción ocurren procesos de disolución y precipitación de minerales secundarios en forma de espeleotemas. Los ejemplos hallados en esta región constituyen los mayores sistemas de cuevas en arcilla hasta ahora conocidos a nivel mundial. El trabajo aporta nuevos datos de interés geomorfológico e hidrológico, a la vez que discute la génesis y probable evolución de las cavidades exploradas.

Palabras clave: Espeleología física, Cuevas en arcilla, Hidrogeología, Geomorfología.

ABSTRACT

New examples of chasms and caves in clay discovered in a sector of the Black Bardena called North gully of La Nasa are described. The region is arid to semi-desert and is located in the south of Navarra. Important caves-systems are developed in clays of Tudela Formation, of Miocene age (Tertiary). The cavities are essentially formed by processes of piping in dispersive clays rich in sodium salts. To a lesser extent dissolution and precipitation of secondary minerals in the form of speleothems occur. The examples found in this region are the largest cave systems in clay hitherto known worldwide. The work provides new geomorphological and hydrological data of interest, while discussing the genesis and probable evolution of the caves explored.

Keywords: Physical Speleology, Caves in clay, Hydrogeology, Geomorphology.

INTRODUCCION

Las cuevas en arcilla presentan rasgos atípicos con respecto al karst en otras litologías. Las cavidades conocidas, en distintas regiones del mundo, ocurren en áreas semi-desérticas, destacando las de Arroyo Tapiado, en el área desértica de Anza-Borrego, California (Lindsay & Lindsay, 1985; Bremner, 2009), y los sistemas de cuevas en arcilla recientemente descubiertos en las Bardenas (Galán, 2015 a, 2015 b; Galán & Nieto, 2015 a, 2015 b; Galán et al, 2015, 2016 a, 2016 b), estos últimos con sistemas de simas y cuevas que alcanzan 880 m de desarrollo y desniveles de hasta -100 m.

La formación de cuevas en arcilla es un fenómeno raro, por tratarse de materiales arcillosos poco consistentes y poco solubles, y por lo tanto poco susceptibles de experimentar procesos de karstificación y generar cavidades (simas y cuevas) a escala humana (macro cavernas). La formación de cavidades en este tipo de terrenos ocurre por procesos de piping o tubificación, con variable intervención de la disolución. Una vez formados los conductos iniciales de drenaje subterráneo, la ampliación de las galerías ocurre principalmente por procesos erosivos.

La tubificación o piping consiste en una remoción de partículas de la roca por flujos canalizados de aguas en materiales granulares y rocas poco solubles (Parker & Higgins, 1990; Dunne, 1990). En su forma pura el piping es el extremo teórico de un espectro espeleogenético, con 100% de disolución kárstica en el extremo opuesto. Entre ambos extremos hay toda una gama de situaciones intermedias, donde disolución y piping pueden actuar juntas, en variables proporciones. La tubificación participa también en el desarrollo de grandes cavidades formadas por procesos múltiples (Halliday, 2004, 2007), y en la formación del karst en cuarcitas en zonas tropicales (Urbani, 1986; Galán, 1991; Galán & Herrera, 2005; Galán & Lagarde, 1988), existiendo un continuo entre cuevas de tubificación y cuevas de disolución, en rocas de distintas solubilidades.

En las Bardenas hemos ido encontrando zonas con una inusitada profusión local de cavidades de distinto tipo en los materiales arcillosos de la Formación Tudela (de edad Mioceno, Terciario). Hay sectores literalmente acribillados por depresiones, dolinas, simas, cuevas, túneles y conductos, que conducen el drenaje subterráneo temporal hacia surgencias en la cabecera de valles secos y barrancos entallados o gullies. Algunos ocurren en el flanco de las mesetas y otros en torno a la red incisa de gargantas y gullies en las zonas bajas y planicies.

Basándonos en la relación encontrada entre la topografía local y la presencia de cavidades, hemos examinado la cartografía digital y la fotografía aérea de distintas zonas, encontrando nuevos sectores de potencial interés. Uno de ellos es el abordado en esta nota, cuya exploración ha dado por resultado el hallazgo de interesantes grupos de cuevas y formas de superficie. El desarrollo de procesos de tubificación o piping en arcilla genera múltiples redes de pequeños conductos, mesocavernas, cavidades y formas de superficie, las cuales conducen el drenaje subterráneo y acompañan a los procesos de erosión normal. En esta nota aportamos varios ejemplos curiosos, a distintas escalas y en distintas posiciones fisiográficas.

Las morfologías observadas en cavidades, abrigos y depresiones mayores, muestran rasgos atribuibles a la continua creación de nuevos conductos o pipes, verticales y horizontales. Las arcillas dispersivas ricas en sales de sodio tienen una alta tendencia al agrietamiento, a la vez que una consistencia cohesiva, con elevados coeficientes de hinchamiento. La circulación temporal de las aguas subterráneas infiltradas propicia la remoción de materiales y la ampliación de los conductos, pero a la vez genera colapsos y deriva hacia la génesis de gullies y depresiones, dando lugar a un modelado peculiar (Figuras 1 á 4). El gradiente hidráulico y la litología de los materiales arcillosos en la vecindad de gargantas y gullies determinan un comportamiento altamente dinámico y condicionan la funcionalidad del conjunto, con rasgos propios de sistemas complejos.

MATERIAL Y METODOS

Las prospecciones efectuadas en este sector de la Bardena Negra estuvieron orientadas por la consulta previa de foto aérea, cartografía digital e información geológica. Las cavidades mayores fueron topografiadas con instrumental de precisión Suunto. En su exploración se utilizaron frontales con iluminación de Leds y técnicas verticales de cuerda estática y jumars. Varias muestras de roca y espeleotemas fueron examinadas en laboratorio bajo microscopio binocular Nikon. Fueron tomadas fotografías a color con una cámara digital Canon a fin de ilustrar las principales características de las cavidades y su entorno.

RESULTADOS

Las cavidades exploradas se localizan al W de la punta N de la meseta de la Nasa Alta o Tripa Azul (629 m snm), en la cabecera del barranco N de La Nasa, sobre el tope de una loma de 456 m snm de altitud, y en los barrancos anexos.

Los terrenos aflorantes son parte de la Formación Tudela (de edad Mioceno) y están constituidos por una espesa secuencia de arcillas ocreas y grises con algunas intercalaciones espaciadas de estratos delgados (decimétricos) de lutitas, calizas y margas calcáreas (unidad litoestratigráfica 396, en: Faci Aparicio et al, 2006; y Cartografía Geológica de Navarra - SITNA). En el cauce del barranco se encuentran también rellenos y acumulaciones detríticas aluviales-coluviales, que incluyen bloques colapsados de las laderas, así como rellenos limo-arcillosos, arenas y gravas, con cantos angulosos de tamaño variable. Algunos de estos depósitos arcillosos poseen delgadas hiladas de cantos de caliza y arenisca, de débil espesor, donde resulta difícil discriminar entre la parte derivada de un origen fluvial y la que posee un origen gravitacional, y a los que se asigna una edad Holoceno.

La región de las Bardenas constituyó una cuenca endorreica, de 600 km². Su parte basal reposa sobre una espesa secuencia de arcillas y yesos (Formación Lerín, de edad Mioceno), que aflora al W. A ella suprayace una secuencia margo-arcillosa sensiblemente horizontal (Formación Tudela, también Miocena). Estos materiales están revestidos por glaciares de cobertura del Pleistoceno (cantos y gravas con abundante matriz limo-arcillosa) y sedimentos Holocenos arcillosos menos compactos en las zonas planas inferiores. Desde el punto de vista sedimentológico, la unidad 396 representa un sistema fluvial que hacia el N pasa a una llanura lutítica distal con pequeños lagos carbonatados. La unidad presenta distintos episodios de sedimentación caliza en pequeños lagos de carácter relativamente efímero y salino, alternando con extensos episodios en los que domina la sedimentación terrígena en ambientes de llanura lutítica aluvial, surcada localmente por pequeños canales fluviales sinuosos.

La cuenca endorreica de las Bardenas se rellenó de sedimentos fluvio-lacustres (fundamentalmente arcillosos y margosos) durante el Eoceno-Mioceno, y al labrar el Ebro su paso y conectar con el Mediterráneo, pasó a ser exorreica en el Mioceno final o en el tránsito Mioceno-Plioceno (Riba, 1964; Salvany, 1989). A partir de entonces los materiales Terciarios van siendo erosionados, vaciando gran parte de la cuenca y originando los relieves tabulares, escarpes y lomas, característicos de la región. Durante el Cuaternario, la dinámica erosiva fluvial ha seguido profundizando el modelado de la región, tanto por la acción llevada a cabo en los fondos de valles, como por la ejercida en las laderas, a lo que se suma la incisión Holocena de la red de drenaje en las planicies. A la misma contribuyen los procesos de tubificación o piping, que involucran la formación de cavidades subterráneas. En esta nota describimos ejemplos de nuevos tipos de cavidades, ilustrativas de la diversidad que presenta la karstificación en arcillas.

DESCRIPCIÓN DE CAVIDADES

Las cavidades exploradas se localizan sobre el tope de una loma denominada La Nasa (456 m snm), situada al E de la Loma de La Madera (451 m snm) y al W de la punta N de la Nasa Alta o Tripa Azul (629 m snm), y a lo largo de la cabecera del barranco que la limita por el N. La fotografía aérea mostraba una zona con depresiones y probables simas en el tope de una loma alargada o interfluvio que se extiende en sentido E-W desde el flanco de la Nasa Alta, separando las cabeceras del barranco Norte de La Nasa de otra rama del barranco de Los Sorianos, situado al S de la misma. El desnivel existente entre las bocas de las simas y el fondo de los barrancos, del orden de -50 m, y la distancia a los mismos, permitía suponer la presencia potencial de una red extensa de galerías subterráneas.

Aunque encontramos tres simas, la mayoría de las probables bocas observables en foto aérea correspondieron a depresiones y dolinas de moderado desnivel y desarrollo. No obstante, las prospecciones sobre el terreno permitieron detectar nuevas bocas y cavidades en la cabecera y a lo largo del barranco Norte de La Nasa, en posiciones inesperadas, a la vez que una gran diversidad de geoformas. Describiremos a continuación las cavidades halladas y sus principales rasgos, separándolas en ocho grupos, que denominaremos La Nasa 01 á La Nasa 08.

La Nasa 01.

Situación: En la parte alta del flanco Sur y sobre el tope de la loma de La Nasa (456 m snm), situada al W de la punta N de la Nasa Alta o Tripa Azul (629 m snm).

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.665.279; E 631.393; Altitud 443 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Se trata de un sistema o conjunto de depresiones y simas, con drenaje hacia el Sur, donde colocamos el Datum para las coordenadas en el borde de la boca de la cavidad más profunda (sima de -12 m de desnivel, situada en el centro de la parte alta de la loma). El desarrollo espacial acumulado de tres simas y ocho depresiones totaliza 104 m de desarrollo. El sistema se extiende sobre la ladera Sur a lo largo de un desnivel de -40 m. Figuras 5 á 8.

Descripción: Ascendiendo por la ladera Sur de la loma, tras sobrepasar un estrato prominente de caliza intercalado en la serie arcillosa, la ladera presenta dos simas, una de -8 m, sin continuidad, y otra de -12 m, con una galería subhorizontal abierta a una boca inferior. Bajo ellas la ladera presenta diversas cárcavas en paralelo que profundizan formando pequeños gullies. El drenaje subterráneo circula bajo ellos a través de mesocavernas y conductos menores.

En la parte alta de la loma, sobre una zona aplanada en su borde Sur, se presenta un conjunto de depresiones y dolinas, algunas circulares y otras irregulares, con diámetros que van de 6 á 12 m. Parte del perímetro a menudo es vertical, con un perfil interno embudiforme y desniveles que no superan los -8 m. En una de las depresiones más amplias se abre una tercera sima, vertical, de -12 m de desnivel. Algunas de estas depresiones poseen en su interior cúspides, crestas y torres menores. Sus fondos, colmatados por materiales arcillosos, drenan a través de pequeños conductos verticales en probable dirección Sur, hacia una rama de la cabecera del barranco de Los Sorianos que limita la loma por el Sur.

La Nasa 02.

Situación: En el cauce de un barranco al NE de la loma de La Nasa, a 320 m de distancia al NE del sistema La Nasa 01.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.665.505; E 631.604; Altitud 402 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Desnivel: 6 m (-4; +2); Desarrollo espacial: 40 m. Figuras 9 á 11.

Descripción: La boca, semioculta y de 2 m de diámetro, se abre en la base de un pequeño escarpe vertical que corta el barranco. Una entrada descendente da paso a una amplia galería subhorizontal, con un meandro entallado de -4 m que se recorre en oposición. Tras este primer tramo la galería se amplía hasta 6 m de diámetro con un recorrido sinuoso, ligeramente ascendente, para finalizar a los 40 m contra la pared de una sala (cota +2 m) con una bóveda de 12 m de altura. Al lado de la alta bóveda se divisa la luz de una pequeña claraboya. La galería se desarrolla bajo el tramo superior del barranco y captura su cauce temporal, aprovechando el fuerte desnivel del perfil longitudinal del barranco en este sector.

Posee algunas espeleotemas de yeso y de mica-illita. Sus paredes son sólidas y bastante lisas. La galería presenta huellas evidentes de un cauce temporal en su piso, que se encañona en meandro entallado en la vecindad de la boca, para desaguar bajo ella a través de pequeños conductos. En la sala final hay pequeños acúmulos de guano de quirópteros.

La Nasa 03

Situación: Al N del barranco anterior, en el sector de cabecera del barranco N de La Nasa, a 200 m al NW de La Nasa 02.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.665.692; E 631.470; Altitud 415 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Se trata de un sistema de tres cavidades muy próximas entre sí. Dos son altos abrigos y la tercera una cueva descendente. El desarrollo espacial de las tres suma 40 m y el sistema se extiende sobre un desnivel de -15 m. Figuras 12 á 16.

Descripción: Los dos abrigos, de amplias bocas, se abren en la base de un escarpe vertical bajo el techo de un estrato de caliza compacta, que les sirve de techo. Ambas bocas son visibles desde lejos. El primer abrigo, de boca rectangular y de 8 m de altura, apenas profundiza 2 m, presentando otro pequeño abrigo del mismo tipo colgado a mayor elevación. Aunque esta cavidad se cierra,



Figura 01. Relieves tabulares, lomas y barrancos con cavidades en la árida región de la Bardena Negra. En la imagen superior las flechas indican la posición de la alargada loma de La Nasa y el barranco Norte, situados al W del extremo N de la meseta de la Nasa Alta o Tripa Azul. En la imagen inferior, pequeñas cavidades.



Figura 02. Arcillas ocre y grises de la Formación Tudela (de edad Mioceno), con lomas, barrancos, cavidades y geofomas, a distintas escalas, generadas fundamentalmente por procesos de tubificación o piping.



Figura 03. Contrastes en la cabecera del barranco Norte de La Nasa. Zonas con depresiones y bloques de colapso en flancos de acentuada pendiente (arriba). Enclaves con vegetación de pino carrasco y encinas en algunas lomas sobre el barranco Norte, entre el árido paisaje predominante (debajo).



Figura 04. La alternancia de cortas lluvias con períodos secos de fuerte insolación favorece el agrietamiento de las arcillas, produciendo infiltración y procesos de pipping, con creación de geformas de superficie, cuevas y gargantas entalladas o gullies. Muchos de estos rasgos no poseen área de cabecera que los alimenten y se forman por pipping y colapso sobre mesocavernas y pipes inferiores que dirigen el drenaje subterráneo.



Figura 05. Dos simas, de -8 y -12 m de desnivel, en la parte alta del flanco Sur de La Nasa, con pequeños barrancos y gullies sobre la parte inferior de la ladera. La sima de la imagen inferior posee una galería de cueva abierta a una boca en la ladera.



Figura 06. Boca inferior de cueva y galería interna con claraboya que enlaza lateralmente con sima de -12 m.
Sistema La Nasa 01.



Figura 07. Sistema La Nasa 01. La mayor parte de las bocas circulares corresponden a dolinas o depresiones embudiformes, con torres, surcos y pináculos en su fondo. En una de ellas, no obstante, se abre lateralmente una sima tubular de -12 m de desnivel.



Figura 08. Otras dos depresiones circulares del sistema La Nasa 01, con sus fondos colmatados y pináculos internos. Obviamente las precipitaciones se infiltran y drenan subterráneamente por pipes inferiores.



Figura 09. Cueva La Nasa 02. Boca de acceso y amplia galería interna, de 40 m de desarrollo.



Figura 10. Galería de amplio volumen interno en la cueva La Nasa 02. Nótese la ocurrencia de pequeños recubrimientos blancos y grises de finísimas espeleotemas aciculares de yeso. La galería, de paredes compactas, finaliza bajo una alta bóveda.



Figura 11. Cerca de la boca de acceso de la cueva La Nasa 02 la galería presenta un cauce entallado formando un estrecho meandro. La cavidad posee espeleotemas de mica-illita formando pequeñas estalactitas y coladas, así como recubrimientos cristalinos blancos de finísimas agujas de yeso.



Figura 12. Bocas de grandes abrigos del sistema La Nasa 03, abiertos bajo un estrato duro de margo-caliza, en las cabeceras del barranco Norte de La Nasa.



Figura 13. Sistema La Nasa 03. Alto abrigo de 8 m bajo solapa rocosa, que profundiza escasos metros (arriba) y boca de cueva descendente en la ladera (bajo el abrigo), con sala y galerías internas es oscuridad (debajo).



Figura 14. Escarpe en el cauce del barranco y el segundo abrigo, de boca más amplia. Sistema La Nasa 03.



Figura 15. Sistema La Nasa 03. Boca del segundo abrigo, galería con escalón de -3 m y fondo colmatado por arcilla y clastos de roca desprendidos del estrato de techo.



Figura 16. Vista desde el interior hacia la boca del abrigo mayor del sistema La Nasa 03. En la foto inferior, vista desde el barranco: se aprecian formas de superficie y la pequeña cueva superior, que conecta con el techo del abrigo a través de una pequeña claraboya que perfora el estrato margo-calizo.



Figura 17. Depresión en el cauce donde se abre la boca y galería de 22 m de la cueva La Nasa 04.



Figura 18. Espeleotemas de yeso sobre el cauce y paredes de la cueva La Nasa 04, con la luz de la boca inferior al fondo. La galería principal prosigue en forma de laminador de escasa altura, impenetrable.



Figura 19. Geformas de superficie en el sistema La Nasa 05: chimeneas de las hadas con numerosas perforaciones de pipes y conductos seccionados en la arcilla de sus troncos columnares.



Figura 20. Sistema La Nasa 05. Diversidad de chimeneas de las hadas y mesocavernas en el cauce del barranco. La boca inferior es una prolongación de los laminadores que siguen al sistema de la cueva La Nasa 04.

bajo la misma, entre la vegetación de la ladera, se abre la boca de una cueva descendente que posee una sala en oscuridad con pequeñas galerías que drenan hacia el barranco, pero se obstruyen por estrechas. El desarrollo espacial suma 20 m y su desnivel es de -8 m. El fondo de la cavidad está levemente por encima del fondo del barranco en ese tramo

Bajo el mismo estrato de caliza, a escasos 20 m al W del primer abrigo, se localiza un segundo abrigo aún más amplio. De boca rectangular, presenta una galería entrante con un escalón de -3 m, que conduce a la base de un tubo subcircular de suelo plano, colmatado de arcilla y pequeños clastos. Pequeñas entalladuras bajo el escalón conducen el drenaje hacia el fondo del barranco. Sobre el estrato de caliza que sirve de techo existe un abrigo menor y una perforación o claraboya de unión entre ambos.

La Nasa 04.

Situación: En el cauce del barranco N de La Nasa, a escasos 10 m al W de las cavidades del sistema de La Nasa 03.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.665.678; E 631.460; Altitud 410 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Desnivel: -4 m; Desarrollo espacial: 22 m. Figuras 17 á 18.

Descripción: La boca, de 1,5 m de diámetro, se abre en una depresión del cauce del barranco, constituyendo un bypass del drenaje epígeo temporal del barranco. Un descenso de -3 m conduce a una galería tubular subhorizontal que forma un meandro de 15 m de largo, para presentar una segunda boca-claraboya que se abre a superficie entre un relleno de bloques del cauce. Bajo esta segunda boca el cauce interno prosigue en laminador (o mesocaverna impenetrable), a escasa distancia bajo superficie. En la galería practicable entre ambas bocas (de 1-1,5 m de diámetro) afloran raíces y posee recubrimientos cristalinos de agujas de yeso.

La Nasa 05.

Situación: A 40 m al W de la cavidad anterior, a lo largo del barranco N de La Nasa.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.665.673; E 631.426; Altitud 402 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Incluimos aquí un conjunto de geoformas de superficie y pequeñas cuevas, sobre las paredes del barranco y entre estratos delgados de margocaliza sobre el mismo cauce, a lo largo de un tramo del barranco de algo más de 70 m de longitud. El desarrollo espacial del conjunto de pequeñas galerías suma 35 m. Figuras 19 á 25.

Descripción: Siguiendo aguas abajo por el cauce temporal se presentan varias bocas de sumideros y surgencias a lo largo de un perfil escalonado, con rellenos de bloques y estratos intercalados de calizas y margas. Estas cavidades constituyen bypass del cauce superficial, que aprovechan las diferencias de nivel para infiltrarse bajo el mismo y reaparecer de nuevo. La mayoría forma laminadores impenetrables por su escasa altura, pero encontramos una cavidad penetrable de 15 m, con una galería de 0,5 m de alto x 2 m de ancho, que posee laminadores menores, algunos de ellos procedentes de los flancos.

Sobre la margen derecha del cauce en este tramo se presentan numerosas torres y "chimeneas de las hadas", constituidas por materiales arcillosos y coronadas por bloques, fragmentados de un estrato métrico de caliza. Muchas chimeneas presentan pipes o pequeños conductos de piping, que deben alimentar los laminadores afluentes de las cavidades del cauce.

Tras un reborde formado por un estrato duro de caliza, que forma un eskarpe vertical y que prosigue varias decenas de metros sobre el lado N del barranco, sigue otro sector, de cauce progresivamente más plano. En este también hay algunos sumideros y mesocavernas en bypass, pero lo más significativo es que el margen derecho del barranco forma un eskarpe o pared vertical muy pronunciada, bajo un estrato duro. Esta pared presenta numerosas acanaladuras, grietas, y dos cuevas (altas y estrechas), con pequeñas galerías habitadas por quirópteros, que observamos en vuelo. Los materiales arcillosos del talud también presentan pipes verticales y geoformas con superficies endurecidas por sales y cuarteadas, con morfologías tipo popcorn.

El conjunto resulta interesante y estéticamente llamativo. Con múltiples ejemplos de procesos de tubificación a distintas escalas. El desarrollo acumulado de la cueva interestratos del cauce y de las dos cuevas con quirópteros del eskarpe suma 35 m de desarrollo de galerías, existiendo infinidad de mesocavernas menores.

La Nasa 06.

Situación: Sobre las paredes del cauce del barranco, en el tramo de 100 m que sigue río abajo al sistema La Nasa 05.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.665.640; E 631.300; Altitud 385 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: De igual modo incluimos aquí un conjunto de cavidades, que totalizan 44 m de desarrollo espacial. El desnivel de la cavidad mayor es de -7 m. Figuras 26 á 31.

Descripción: Tras un tramo en que el barranco presenta una sección en V, su perfil longitudinal se suaviza, presentando numerosos rellenos detríticos aluviales-coluviales, a los que se atribuye una edad Holoceno, pero que están en continuidad con los materiales arcillosos Pliocenos. El barranco se amplía y encañona, limitado a ambos lados por paredes verticales arcillosas (de 6 á 12 m de altura) con hiladas de pequeños cantos angulosos de caliza y arenisca incluidos en la matriz arcillosa.

Sobre las paredes de la margen derecha encontramos pequeñas cavidades, afluentes hacia el barranco, que se cierran por estrechas; la mayor de ellas alcanza 12 m de desarrollo. Sobre la margen izquierda encontramos dos cuevas que forman túneles, enlazando galerías horizontales y oblicuas con la base de simas o claraboyas amplias, abiertas a superficie en el margen del plano o talud superior; la mayor de ellas es una sima-cueva de -7 m de desnivel y 15 m de desarrollo. En adición, hay numerosas formas residuales, con arcos y puentes de roca, similares a los que se encuentran en la red de gullies de la Bardena Blanca.

La Nasa 07.

Situación: Al NW de La Nasa 06, donde el barranco se amplía antes de su confluencia con el barranco de Los Sorianos.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.665.684; E 631.120; Altitud 382 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Desnivel: -12 m; Desarrollo espacial: 80 m. Figuras 32 á 36.

Descripción: Se trata de una amplia depresión alargada, subdividida en dos ramas, que catalogamos por estar contorneada en todo su perímetro por paredes verticales, de 6 á 10 m de desnivel. Podría también considerarse una depresión o forma de superficie, pero posee pequeñas cavidades internas, conductos de piping y geoformas de gran interés. La depresión se desarrolla en arcillas Holocenas, sobre una planicie anexa situada inmediatamente al S del cauce del barranco y en paralelo al mismo.

Su topografía tiene un trazado en bayoneta, con el eje mayor de 60 m de largo x 10 m de ancho, y con una rama lateral de 20 m de largo x 8 m de ancho. Una pequeña ventana o corta galería perfora el tabique que separa en su parte Sur ambas ramas. El perímetro, festoneado, presenta paredes con surcos y pipes, muy pronunciados en su cabecera Sur, con numerosos ejemplos de colapsos de las paredes, vuelcos y rellenos de bloques en su base, con oquedades y galerías menores entre tales rellenos.

Es interesante porque se aprecia perfectamente la evolución remontante de la depresión por procesos de piping, colapso y remoción de los materiales desprendidos. El volumen de material arcilloso vaciado para formar la depresión es del orden de 4.800 m³. El interior de la depresión no posee un cauce para exportar materiales, por lo que el drenaje (temporal) profundiza verticalmente para luego fluir horizontalmente hacia el fondo del barranco anexo. Estas circulaciones laminares a través de pipes y pequeños conductos no llegan a formar cavernas pero exportan un volumen grande de materiales arcillosos. Puede comprenderse entonces que en buena parte de la erosión de las Bardenas están involucrados los procesos de piping, particularmente en las planicies. Aunque en último término es la red epigea de drenaje temporal la que exporta los materiales erosionados.

La Nasa 08.

Situación: En el flanco Sur de La Nasa, al W del tope de la loma donde se localiza el sistema La Nasa 01.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.665.318; E 631.264; Altitud 435 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Desnivel: -4 m; Desarrollo espacial: 40 m. Figuras 37 á 38.

Descripción: Se trata de un gran abrigo-cueva, semicircular, que se desarrolla bajo un estrato de caliza intercalado en la serie. Dicho estrato, horizontal y de un metro de potencia, ha ido siendo puesto en relieve por la erosión de superficie, ampliándose hasta formar un anfiteatro semicircular de 24 m de diámetro. El material arcilloso bajo el estrato ha sido removido por un flujo subterráneo, a la vez que el borde superior colapsaba en bloques, cerrando y limitando el espacio interno con rellenos de arcilla y bloques. Entre el relleno y la pared interna se forma una cueva, con varias bocas o aperturas entre los bloques colapsados, y tramos de galerías en oscuridad. La cavidad posee un cauce temporal que recorre el perímetro interno y prosigue en sus extremos en laminadores impenetrables. El drenaje procede de una depresión superior en la ladera. Ejemplos parecidos, a menor escala, se presentan bajo estratos duros que forman escalones en el cauce del barranco Norte de La Nasa.

NOTAS GENERALES

El conjunto de cavidades exploradas en este sector de la Bardena Negra suma un total de 405 m de galerías subterráneas y una cifra sin duda considerablemente mucho mayor de mesocavernas y pequeños conductos. Muchas simas y depresiones, de amplia apertura en superficie, finalizan obstruidas por rellenos detríticos o se prolongan en laminadores y mesocavernas de débil diámetro, siendo evidente la continuidad de los procesos de piping y exportación de materiales por flujos subterráneos basales.

Un caso inverso lo presenta la cavidad mayor de las exploradas, la cueva La Nasa 02. En este caso la boca de acceso inferior, con un meandro entallado, es de menor diámetro que la amplia galería horizontal interna. Tal volumen interno posiblemente ha sido excavado en fases sucesivas, formando una galería colectora que iría ampliando su diámetro por piping y colapsos, y por erosión y remoción basal de los materiales desprendidos durante las crecidas hidrológicas. La galería habría ido ampliándose hacia su cabecera, con captura progresiva de las filtraciones a niveles más altos. Ello requiere a la vez de cierta cohesión de los materiales arcillosos de sus paredes y bóvedas, probablemente lograda por la capacidad de hinchamiento y adherencia que presenta este tipo de arcillas dispersivas, ricas en sales de sodio. Otras grandes cavidades en los flancos de la Nasa Alta y de la Nasa Baja, presentan también grandes conductos en su interior, que se estrechan y disminuyen de diámetro en la zona próxima a sus bocas inferiores, normalmente localizadas en la cabecera o inicio de los barrancos. Es decir, se trata de cavidades subterráneas que prosiguen en superficie formando cañones y barrancos entallados o gullies.

Aparentemente el primer tipo de situaciones ocurre cuando la infiltración se produce en forma dispersa, en planicies y flancos con relieves poco marcados, mientras que el segundo tipo de situaciones requiere de una infiltración concentrada, con un área de captura mayor, constituida bien por zonas deprimidas superiores o bien por la zona alta de barrancos o torrenteras en proceso de excavación. En todos los casos los caudales subterráneos temporales se dirigen y tienen por nivel de base local (o punto de surgencia) la base de la red entallada de barrancos en la zona. Así, la posición fisiográfica que ocupan en el relieve y el gradiente hidráulico, condicionan, junto a la litología de los materiales, que se genere un tipo u otro de cavidades.



Figura 21. Cavity formada sobre un estrato de caliza en el cauce del barranco, con varias bocas en bypass del cauce epígeo temporal que recorre el fondo del barranco. Sistema La Nasa 05.



Figura 22. Tras el sector con chimeneas de las hadas, el barranco Norte de La Nasa presenta un marcado escarpe vertical bajo un estrato de caliza. Las paredes bajo el mismo, verticales, presentan surcos, canales, conductos seccionados y dos cuevas altas y estrechas. Sistema La Nasa 05.



Figura 23. Escarpe vertical bajo estrato resistente de caliza, con dos cuevas con galerías internas habitadas por quirópteros. En el talud, diversas geoformas de superficie, con conductos de piping. Sistema La Nasa 05.



Figura 24. Bocas altas y estrechas de cavidades habitadas por quirópteros. Sistema La Nasa 05.



Figura 25. El cauce del barranco, bajo las cavidades del sistema La Nasa 05, presenta varios sumideros y surgencias, en forma de laminadores de escaso diámetro y por lo tanto impenetrables, pero es obvia la circulación subterránea que se producirá en estos tramos en caso de lluvia.



Figura 26. Aguas abajo del sistema La Nasa 05, el cauce del barranco presenta un perfil escalonado por resaltes bajo estratos duros de calizas y margas. En el cauce se presentan cortas cuevas-túneles entre rellenos detríticos de origen aluvial-coluvial, a los que se atribuye una edad Holoceno.



Figura 27. Sistema La Nasa 06. Pequeñas cavidades, afluentes al cauce del barranco, excavadas en arcillas Holocenas. Presentan hiladas de cantos de caliza y de arenisca, y cierto contenido arenoso. Las paredes de estas cuevas resultan menos coherentes y se desagregan fácilmente en materiales pulverulentos.



Figura 28. Sistema La Nasa 06. Detalle de las galerías de pequeñas cuevas en arcillas Holocenas, con clastos de distintos tamaños, y geofomas de superficie formando torres, puentes y arcos de rocas, con tubos de piping. Este tipo de cavidades y geofomas son muy frecuentes en la Bardena Blanca, en torno a la red de gullies.



Figura 29. Paredes del barranco con arcillas Holocenas en el sector del sistema La Nasa 06. Detalle de hiladas de clastos angulosos de caliza y arenisca incluidas entre los materiales arcillosos, oquedades, pequeñas cuevas y geofomas, con morfologías que recuerdan a las halladas en los barrancos de la Bardena Blanca.



Figura 30. Sima de -7 m del grupo La Nasa 06. La sima prosigue en su base en una corta galería horizontal que enlaza con el cauce del barranco. Arriba: vista de la boca inferior hacia la base de la sima. Debajo: Vista hacia el barranco externo.



Figura 31. Grupo La Nasa 06. Otra sima-túnel que enlaza con el barranco a través de una galería oblicua y pequeñas cavidades en las paredes de enfrente, desarrolladas en arcillas Holocenas.



Figura 32. La larga depresión La Nasa 07 se desarrolla en paralelo al barranco de La Nasa, sobre una zona plana contigua, en arcillas Holocenas. Tiene en planta un trazado en bayoneta, con dos ramas en su cabecera, y está contorneada por paredes verticales en casi todo su perímetro.



Figura 33. Depresión La Nasa 07, de contornos festoneados, con paredes verticales que poseen numerosos surcos y conductos de piping, los cuales generan colapsos y vuelco de bloques desprendidos de las paredes.



Figura 34. Entre los rellenos del fondo de la depresión se forman nuevos pipes y pequeñas cavidades, que profundizan bajo el relleno para drenar subterráneamente hacia el talweg del barranco.



Figura 35. Evolución remontante por piping y colapsos de las cabeceras de la depresión La Nasa 07. Se aprecia el colapso por recorte vertical de las paredes. Los materiales desprendidos van siendo removidos a través de pequeños conductos y pipes inferiores, ampliando la cavidad. Se observa también la ventana que comunica ambas ramas de la extensa depresión.



Figura 36. Paso a través de la ventana que perfora el tabique entre las dos ramas de la cabecera de la depresión La Nasa 07, con grandes colapsos en la rama Sur. Se trata del mismo proceso que forma barrancos entallados o gullies solo que en este caso la amplitud de la cavidad y el volumen removido de arcillas es muy considerable.



Figura 37. Cueva-abrigo La Nasa 08, de 40 m de desarrollo. La galería se ha formado bajo un estrato de caliza que le sirve de techo, limitada entre rellenos de colapso y la pared arcillosa del fondo, cuyo base presenta un cauce seco. El drenaje subterráneo procede de una zona deprimida superior.



Figura 38. Cueva La Nasa 08. Con varias bocas sobre el perímetro externo del amplio anfiteatro (imagen superior) y galería interna con cauce temporal. El drenaje procede de un laminador y desaparece en otro en su extremo SW.



Figura 39. El árido paisaje al Norte del barranco de La Nasa, con distintos relieves, cavidades formadas por piping en arcillas y diversidad de geformas. En la imagen superior se aprecia al fondo la planicie central y los relieves tabulares de la Bardena Blanca. En la inferior, cauce seco con arcillas cuarteadas y costras de sales.



Figura 40. Formas de superficie con relieves fractales, que reproducen en miniatura los rasgos de formas mayores y de las cavidades formadas por piping en la región de las Bardenas. Un territorio extenso, con aspectos de gran interés científico sobre los procesos de karstificación, erosión y formación de cavidades en arcilla, los cuales han generado rasgos geomorfológicos notables, de estética llamativa.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tanto los procesos de piping como los procesos de erosión normal están presentes en la formación de cavidades en arcilla en las Bardenas. Las cavidades exploradas en este sector de La Nasa sugieren una estrecha co-evolución de sistemas de simas, cuevas, pipes y gullies en arcilla, que en su evolución se condicionan mutuamente.

Unos rasgos podrán luego dar lugar a otros, en nuevas situaciones, determinadas por el rebajamiento y entallamiento local del relieve, a distintas escalas. Hasta ahora, nuestro conocimiento (obtenido a través de las exploraciones efectuadas) sugiere que las cavidades mayores pueden formarse en flancos de acentuada pendiente en arcillas Miocenas de la Formación Tudela. Pero a la vez están ampliamente extendidas las cavidades de escaso desarrollo en las arcillas Holocenas de las zonas bajas y planicies. A lo largo de los barrancos existe además una amplia ocurrencia de fenómenos de autocaptura o bypass, donde aprovechando el desnivel del perfil se excavan cuevas bajo el cauce o lateralmente respecto al mismo.

La litología de estos materiales arcillosos, de estructura masiva, posee altos valores de SAR (Sodium Adsorption Ratio) y sodio intercambiable (ESP: Exchangeable Sodium Percentage), un pH alcalino (8.3 á 9) y coeficientes de hinchamiento que pueden llegar hasta el 12%. Cuando el sodio representa un alto porcentaje del total de cationes puede producirse piping con facilidad. El piping en estos casos coincide con materiales poco coherentes como limos y arcillas con un elevado contenido en sales. Estos materiales pueden verse afectados por la disolución del sodio, de manera que se acelera la pérdida de coherencia y se facilita la exportación de materiales finos en los conductos iniciales por los que fluye el agua. A la vez, al haber un predominio de arcillas expansivas, se favorece el agrietamiento y la canalización de la escorrentía hacia el interior del sedimento, siguiendo unas líneas preferentes de flujo subsuperficial.

El proceso de piping en estas arcillas típicamente comienza con el transporte laminar de partículas a través de pequeñas grietas, pudiendo ocurrir una cantidad limitada de disolución intergranular de la matriz o de las partículas. Una vez que se establece un conducto continuo, el transporte se vuelve turbulento y la socavación aumenta el mecanismo erosivo. A medida que los tubos se hacen más grandes, aumenta el volumen de flujo. El hundimiento y colapso local del techo pueden permitir la entrada de volúmenes adicionales de escorrentía, ampliando aún más los conductos, e incorporar fragmentos de la superficie, lo que lleva al desarrollo de conductos tortuosos. Los tubos resultantes pueden propagarse verticalmente o con cierta inclinación, y pueden desarrollarse trezados y redes dendríticas. En otros casos, los conductos incipientes desarrollan en su parte inferior otras hendiduras, dando lugar de novo a la remoción de partículas, con una tendencia final a la horizontalidad, determinada por el nivel de base local impuesto por el fondo del barranco hacia el cual desaguan.

Las arcillas cambian sus propiedades físicas según su estado de hidratación. La alternancia de expansión y contracción forma repetidamente grandes y pequeñas grietas. Algunas arcillas son especialmente plásticas cuando están mojadas, y pueden formar bloques de dislocación, deslizamientos y colapsos, cuya posterior remoción contribuye significativamente a la erosión y a la ampliación volumétrica de las galerías. Un alto contenido en sodio intercambiable desflocula estas arcillas, concentrando el flujo de agua en las grietas y proporcionando una lubricación adicional.

El piping se inicia con la formación de agrietamientos en el suelo superior, asociados a la expansión y contracción de las arcillas bajo las condiciones climáticas alternas de humectación y desecamiento. Nuestras observaciones sugieren que el alto contenido en sodio intercambiable, yeso, micas y otros filosilicatos, o incluso los granos de cuarzo, pueden experimentar cierto grado de disolución, desagregando los materiales parentales y canalizando los flujos de infiltración hasta formar canalículos y conductos tubulares (pipes) que facilitan la remoción intergranular. Ocurre entonces la canalización de las aguas subterráneas siguiendo unas líneas preferentes de flujo. La presencia de niveles menos permeables en profundidad favorece la circulación horizontal y la evolución de los conductos. Puede comprenderse también que para que las aguas infiltradas circulen y desagüen es necesario que exista cierto gradiente hidráulico, como en el karst clásico, en este caso determinado por el salto topográfico existente entre la superficie y el fondo entallado de los barrancos.

La ampliación de los conductos prosigue por erosión del material particulado, y por desprendimientos y colapsos de volúmenes mayores, que son removidos en aguas altas. Nótese que los largos períodos sin lluvia y de fuerte insolación favorecen la desecación y el agrietamiento, que dirigen la infiltración vertical, la cual es seguida posteriormente por una fuerte erosión cuando las precipitaciones son intensas, tendiendo en la parte basal a organizar flujos subhorizontales hacia el fondo de los barrancos. Si los procesos persisten llegan a formarse auténticas cuevas con galerías de hasta varios centenares de metros de desarrollo.

Cabe destacar que en las cavidades de mayor desarrollo de galerías y amplios volúmenes internos, sus paredes y bóvedas resultan bastante compactas, como si la humectación y ventilación de su atmósfera interna hubiera propiciado el hinchamiento y/o adhesión de los componentes arcillosos, otorgándoles mayor estabilidad que la que se observa en mesocavernas y conductos menores. Muestras de las arcillas de estas paredes, observadas al microscopio binocular, no muestran la presencia de minerales secundarios cementantes, pero si una estrecha imbricación de las partículas arcillosas, con menor porosidad aparente que las arcillas de superficie. Ello sugiere que cuando los pipes o conductos de tubificación evolucionan hasta generar macrocavernas (a escala métrica) pueden modificar levemente sus propiedades físicas (su plasticidad, grado de coherencia y resistencia mecánica), confiriendo a las galerías mayor estabilidad y persistencia en el tiempo.

Sin duda los procesos y rasgos observados en las cavidades exploradas sugieren nuevos interrogantes. También observamos en geoformas de superficie una repetición de rasgos que se presentan a mayor escala en cuevas y conductos mayores, y que parecen ser de naturaleza fractal, donde sucesivas iteraciones amplifican los fenómenos. Las morfologías observadas en distintos tipos de macrocavernas se presentan como miniaturas en muchos sectores de superficie (Figuras 39 á 40). La evolución conjunta del modelado de la región, acompaña a la karstificación de las arcillas, génesis de cavidades a distintas escalas, y formación de barrancos y gullies. Nuevas condiciones locales extienden la ocurrencia de los procesos de piping (ampliamente predominantes), pero interviene también cierto grado de disolución de los materiales, como lo prueba la formación y presencia de espeleotemas en las cavidades. Las cuevas y geoformas encontradas en este sector de La Nasa agregan nuevos ejemplos sobre procesos de karstificación en arcilla y sobre la geomorfología del conjunto de la región.

Nuestra principal conclusión es que cada sucesiva prospección va aportando nuevos datos sobre la inusual y poco conocida karstificación y formación de cuevas en arcilla. Revelando a su vez que la región de las Bardenas posee en este sentido un alto interés científico, ya que contiene numerosos sistemas de cavidades, de distinto tipo, y algunos de los mayores sistemas de cuevas en arcilla hasta ahora conocidos a nivel mundial.

BIBLIOGRAFÍA

- Bremner, L. 2009. The Carrizo Badlands Mud Caves in Arroyo Tapiado. Anza-Borrego Desert State Park. California. Desert USA.
- Dunne, T. 1990. Hydrology, mechanics and geomorphological implications of erosion by subsurface flow. In: Higgins, C.G. & D.R. Coates, eds. 1990. Groundwater geomorphology: The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms. Geological Society of America, Special Paper 252.
- Faci Paricio, E.; G. Galán Pérez; A. García de Domingo; P. Cabra Gil; J. González Lastra & G. Díaz Pinto. 2006. Memoria de la Hoja 283-I Portillo de Santa Margarita. Cartografía Geológica de Navarra, escala 1: 25.000. Gobierno de Navarra. 82 pp.
- Galán, C. 1991. Disolución y génesis del karst en rocas silíceas y rocas carbonáticas: un estudio comparado. *Munibe (Ciencias Naturales.)*, S.C.Aranzadi, 43: 43-72.
- Galán, C. 2015 a. Sistemas de cuevas en arcilla de 880 m de desarrollo explorado (Bardena Negra). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 55 pp.
- Galán, C. 2015 b. 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. & F. Herrera. 2005. Sistema Roraima Sur, Venezuela: la mayor cavidad del mundo en cuarcitas: 11 km. Pág. web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 27 pp. + Reeditado en Pág. web Cota0.com.
- Galán C. & J. Lagarde. 1988. Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quartzites du Roraima. *Karstologia* 11-12: 49-60.
- Galán, C. & M. Nieto. 2015 a. Cuevas de tubificación y cárcavas en arcilla: pseudokarst de las Bardenas. Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 51 pp.
- Galán, C. & M. Nieto. 2015 b. Nuevos datos sobre cuevas en arcilla, cárcavas y cañones en la Bardena Negra. Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 38 pp.
- Galán, C.; M. Nieto; Dv. Arrieta & Daniel Arrieta. 2015. Espeleotemas y quirópteros en una cueva en arcilla de 158 m de desarrollo (Bardena Negra). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, PDF, 42 pp.
- Galán, C.; M. Nieto; J. Forstner & A. Miner. 2016 a. Cavidades en arcilla en el Barranco de Los Sorianos (Bardena Negra). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 52 pp.
- Galán, C.; J.M. Rivas; M. Nieto & J. Fortsner. 2016 b. Notas sobre procesos de tubificación, cuevas y geoformas en la Bardena Blanca. Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 52 pp.
- Halliday, W.R. 2004. Piping caves and Badlands pseudokarst. In: Gunn, J. Ed. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. Taylor & Francis Books, London: 1260-1268.
- Halliday, W.R. 2007. Pseudokarst in the 21ST century. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (1): 103-113.
- Lindsay, L. & D. Lindsay. 1985. *The Anza-Borrego Desert Region*. Wilderness Press, 170 pp.
- Parker, G. & C. Higgins. 1990. Piping and pseudokarst in drylands. In: Higgins, C.G. & D.R. Coates, eds. 1990. *Groundwater geomorphology: The role of subsurface water in earth-surface processes and landforms*. Geological Society of America, Special Paper 252.
- Riba, O. 1964. Estructura sedimentaria del Terciario Continental de la Depresión del Ebro en su parte riojana y Navarra. Aportación española al XX Congr. Geogr. Int. Reino Unido. Zaragoza.
- Salvany, J.M. 1989. Los sistemas lacustres evaporíticos del sector navarro-riojano de la Cuenca del Ebro durante el Oligoceno y Mioceno inferior. *Acta Geol. Hisp.*, 24: 3-4.
- Urbani F. 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. *Interciencia*, 11 (6): 298-300.