NOTAS SOBRE CUEVAS EN ARCILLA EN EL BARRANCO DEL ABEJAR (BARDENA NEGRA).

Notes about caves in clay in the Abejar canyon (Black Bardena).

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

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

NOTAS SOBRE CUEVAS EN ARCILLA EN EL BARRANCO DEL ABEJAR (BARDENA NEGRA).

Notes about caves in clay in the Abejar canyon (Black Bardena).

Carlos GALÁN; Marian NIETO; Juliane FORSTNER & Daniel ARRIETA.
Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.
Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.
E-mail: cegalham@yahoo.es
Octubre 2016.

RESUMEN

Se describen nuevas cavidades en arcilla encontradas en el Barranco Norte del Abejar y flanco Sur de la Plana de La Culebra (Caídas de La Negra, Bardena Negra). Las cavidades se desarrollan en una unidad de arcillas ocres y grises pertenecientes a la Formación Tudela (de edad Mioceno, Terciario). Los barrancos presentan en sus paredes pequeñas cavidades y cárcavas generadas por piping. La cavidad mayor encontrada es una cueva que enlaza con una sima superior, y prosigue formando un gully sobre el flanco. Dicha cavidad alcanza 72 m de desarrollo e ilustra muy bien el mecanismo general de génesis de cavidades en arcilla. La nota discute los rasgos y procesos observados.
Palabras clave: Cuevas en arcilla, Geoespeleología, Geomorfología, Karstología, Tubificación, Geoformas.

ABSTRACT

New cavities in clay found in the North Abejar Canyon and in the South flank of the Snake Plain are described (Black Falls, Black Bardena). The cavities are developed in a unit of ochre and gray clays belonging to the Tudela Formation (of Miocene age, Tertiary). The ravines have on its walls small cavities and pipes generated by piping. The larger cavity found is a cave that connects with a chasm higher, and continues forming a gully on the flank. Said cavity reaches 72 m of development and illustrates very well the general mechanism of genesis of cavities in clay. The note discusses the traits and processes observed.
Key words: Caves in clay, Geospeleology, Geomorphology, Karstology, Piping, Geoforms.

INTRODUCCION

El presente trabajo es parte y continuación de una serie de prospecciones efectuadas en distintos sectores de la Bardena Negra (Galán, 2015; Galán et al, 2016). En este caso en la parte más meridional de Las Bardenas, sobre el flanco Sur de la meseta más alta de la región (Plana de La Negra, 650 m snm), sector también conocido como Caídas de La Negra. Este sector cubre un área de 25 km^2 y drena directamente al Ebro, presentando amplias zonas con bosques de pino carrasco. Posee una serie de lomas separadas por barrancos, con tramos encañonados y gullies, donde se encuentran numerosas cavidades en arcillas ocres y grises de la Formación Tudela (de edad Mioceno).

La ocurrencia de cuevas en arcilla es un fenómeno raro a nivel mundial, por tratarse de materiales poco coherentes, poco solubles y poco susceptibles de experimentar karstificación. No obstante, en la región de Las Bardenas (Sur de Navarra) la formación de cavidades por procesos de piping está ampliamente extendida, a distintas escalas, conteniendo numerosas macrocavernas y los mayores sistemas de cuevas en arcilla hasta ahora conocidos a nivel global. En general predominan cuevas y simas de sólo algunas decenas de metros de desarrollo, pero si se dan juntas una serie de condiciones adecuadas pueden formarse cuevas y sistemas extensos, alcanzando la mayor cavidad individual hasta ahora explorada 380 m de desarrollo y -40 m de desnivel (Sima Nasa Alta 04) y algunas otras de más de un centenar de metros de desarrollo (Galán, 2015).

El territorio de Las Bardenas es muy extenso, cubre un área de 40 km en sentido N-S por 20 km en sentido E-W, con una superficie total del orden de 600 km^2. La región es árida a semidesértica y alterna extensas planicies con mesetas y cerros tabulares de formas caprichosas (Figuras 1 á 4), ya que es el resultado del modelado y vaciado de los materiales arcillosos que rellenaron una antigua cuenca endorreica durante el Mioceno. La región está surcada por una red de drenaje temporal, constituida por una serie de barrancos mayores, ramificados en otros menores, con numerosos cañones y gullies formados precisamente por procesos de tubificación o piping (Halliday, 2004). Esta red encajada de drenaje temporal actúa como nivel de base local para transferir la infiltración que se produce en los flancos de las mesetas y en la vecindad de los

barrancos (Dunne, 1990; Parker & Higgins, 1990). Aunque el proceso de piping es el mecanismo fundamental para la formación de cavidades en estas arcillas ricas en sales de sodio, también ocurre cierto grado de disolución intergranular. En el crecimiento volumétrico de las cavidades (desde pequeños conductos o pipes hasta alcanzar mayores diámetros y formar macrocavernas) sigue actuando el piping, acompañado por colapsos y sobre todo por procesos erosivos, que socavan los conductos y remueven los materiales desprendidos, exportándolos.

Existe en consecuencia una asociación y co-evolución entre pipes, cuevas y gullies. Para que actúe el piping es necesario que exista cierto gradiente hidráulico y por ello la densidad de conductos de piping aumenta cerca de las paredes de los gullies y barrancos. Pero el tema encierra aspectos controversiales, ya que si bien los gullies propician la formación de cuevas, también sucede de modo inverso que es la ocurrencia de piping y la presencia de cuevas las que generan los gullies. De hecho gran parte del modelado de barrancos entallados, y formación y retroceso de las cabeceras de la red de gullies, ocurre por procesos de piping, que incluyen la formación de cavidades, a distintas escalas. El orden en que unos procesos preceden o siguen a otros constituye una trama de cierta complejidad. En este sentido los ejemplos reales encontrados en campo aportan valiosa información para comprender la génesis y evolución de las cuevas y formas de superficie; y, por consiguiente, para entender mejor el modelado erosivo de la región. Aspectos a los que volveremos en el apartado de Discusión.

Las exploraciones efectuadas en las Bardenas, a medida que se extienden a distintos sectores, van aportando nuevos datos, sobre la ocurrencia de cuevas y sobre los procesos y mecanismos que intervienen en su formación. Por ello nuestro interés en seguir prospectando áreas nuevas, ya que potencialmente pueden contribuir con el hallazgo de cuevas mayores o con ejemplos que ilustren los procesos de karstificación en arcillas, una litología atípica para la formación de cuevas.

El sector prospectado objeto de esta nota suma ejemplos similares a otros previamente descritos, de cavidades de modestas dimensiones y diversas geoformas, pero también agrega el hallazgo de una cueva de 72 m de desarrollo, que ilustra la formación de cuevas en arcilla, su asociación con los procesos de piping y erosivos y la co-evolución con gullies.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos presentados corresponden a prospecciones efectuadas en un sector de las Caídas de La negra (Bardena Negra), que comprende el Barranco Norte del Abejar y la Plana de La Culebra. En la exploración de cavidades se utilizó iluminación de Leds y técnicas de cuerda estática y jumars. En la topografía de cavidades se utilizó material de precisión Suunto. El plano de la cavidad mayor ha sido dibujado en programa Freehand. Se utilizaron dos cámaras digitales (Canon y Nikon) para ilustrar los principales rasgos de las cavidades y su entorno.

RESULTADOS

El sector explorado se localiza en la parte central de las Caídas de La Negra y comprende: el Barranco Norte del Abejar; un conjunto de lomas entre la Barrera de Clemente y la Plana de La Culebra; y el Barranco Sur de la Plana de La Culebra. Más algunos tramos de cañones afluentes a los citados barrancos, hasta su zona de cabecera. Los sectores explorados se localizan entre cotas de 360 y 503 m snm de altitud.

La litología dominante es una potente secuencia de arcillas ocres y grises pertenecientes a la Formación Tudela (de edad Mioceno, Terciario). Esta serie presenta intercalaciones espaciadas de estratos delgados (decimétricos) de calizas y margas calcáreas, con algunos estratos de arenisca y lutitas rojas en su tramo superior (Faci Aparicio et al, 2006). Las arcillas poseen un alto contenido en sodio intercambiable y elevados coeficientes de expansión y dispersión. En el cauce de los barrancos se encuentran algunas acumulaciones detríticas, de origen mixto, aluvial-coluvial, a las que se asigna una edad Holoceno, las cuales se interdigitan con materiales arcillosos Miocenos colapsados de las paredes. Los flujos de aguas subterráneas y las cuevas pueden perforar y tener continuidad entre ambos. Sobre los flancos de lomas y mesas también son abundantes coluviones y bloques colapsados de los estratos duros de sus topes y glacis de cobertera (cantos y gravas con matriz limo-arcillosa, de edades Pleistoceno).

Los procesos de piping en los materiales arcillosos involucran asimismo cierto grado de disolución, como lo prueba ampliamente el proceso inverso de precipitación de minerales secundarios y formación de espeleotemas. En estas arcillas actúa la disolución intergranular, afectando a sus distintos componentes minerales. Fundamentalmente, la disolución del sodio desflocula estas arcillas, y de este modo acelera la pérdida de coherencia y facilita la exportación de materiales finos en los conductos iniciales de piping 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 determinadas por el gradiente hidráulico. En la vecindad de las paredes verticales de los barrancos, se forman continuamente conductos de piping, que profundizan verticalmente, para luego drenar horizontalmente hacia el nivel de base local impuesto por el fondo del cañón. Muchos de ellos forman surcos verticales y cárcavas, así como mesocavernas y pequeñas macrocavernas en su zona basal (Figuras 05 y 06).

En el barranco Norte del Abejar encontramos diversos ejemplos a lo largo de sus paredes. La incisión de pipes verticales genera además colapsos y vuelcos, que destruyen los conductos anteriores y forman acumulaciones detríticas. Estas van siendo removidas por la erosión fluvial durante las crecidas. También pueden formarse pequeñas cavidades y cortos túneles que perforan las acumulaciones de gravas y guijarros entre los meandros de su cauce y/o los rellenos Holocenos (Figura 07). De igual modo se forman cuevas y simas que perforan las paredes a distintos niveles, enlazando mediante galerías los flancos adyacentes con el fondo del barranco. El ejemplo más significativo encontrado lo constituye la Cueva del Abejar (Figuras 08 á 15), que describiremos en primer lugar, antes de referir otros casos.

DESCRIPCIÓN DE LA CUEVA DEL ABEJAR

Situación: A 250 m al N de la confluencia del barranco N del Abejar con el barranco S de la Plana de La Culebra, sobre la margen izquierda (Este) del barranco del Abejar.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.654.991; E 636.205; Altitud 388 m snm. Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Desnivel: +12 m; Desarrollo espacial: 72 m. Fotos en Figuras 08 á 14. Plano en Figura 15.

Descripción:

Se trata de una cueva horizontal, surgente, cuya boca se abre a nivel del talweg del barranco. Esta enlaza con la base de un conjunto de simas (de -8 m a -5 m de desnivel) que prosiguen con otros tramos techados, en forma escalonada, hasta una sima-gully superior finalizada bajo un escalón vertical de +3 m. Su borde superior es la cota +12 m, donde termina la depresión cerrada. Este borde queda incluido en un pequeño barranco, el cual prosigue ascendiendo por el flanco, formando otros tramos tipo gully hacia la parte alta SW de la Plana de La Culebra.

La boca de acceso, de 1,5 m de diámetro, da paso a una galería meandriforme de 12 m, que se ramifica en dos conductos para volver a unirse a continuación. El tramo inferior es un laminador estrecho por donde circula el cauce. El superior es más amplio, fósil, y posee algunas espeleotemas de yeso, que forman recubrimientos milimétricos blancos de cristales aciculares y frostworks de yeso.

La cueva enlaza con la base de una sima o claraboya de -8 m de desnivel. Una galería lateral enlaza con la continuación basal de la sima. Sigue otro tramo de sima abierta, con un pequeño lateral, cruza bajo otra zona techada (que forma un puente de roca), nueva sima alargada de -5 m, otro tramo techado de 6 m de largo, y un último tramo que forma una sima-gully entallada de 12 m de longitud, que finaliza al pie de una pared vertical de +3m. En este recorrido la galería asciende +9 m, que sumados a los +3 del resalte de fondo, da un desnivel de +12 m. El desarrollo espacial es de 72 m (56 m subhorizontales, a los que sumamos 16 m de verticales de las simas de -8, -5 y -3 m). (Ver plano en Figura 15).

A lo largo de la cavidad se observan diversas huellas de la actividad hídrica temporal, con zonas con cauces de arcillas finas y restos vegetales aportados por las crecidas y marcas de nivel a distintas alturas. En la galería de acceso (entre la boca y la sima de -8 m) hay indicios de que las aguas pueden alcanzar 1 m de altura durante las grandes crecidas. No obstante esta galería está prácticamente despejada de rellenos detríticos, mientras que bajo los tramos de simas hay más sedimentos y terrazas con restos vegetales colgadas sobre las paredes, así como acumulaciones de vuelcos y colapsos de las paredes, surcadas por tubos de piping.

El perfil de la galería principal muestra rasgos similares a otras cavidades con perfil en L, sólo que su parte horizontal es considerablemente más larga, y en ella los conductos de piping verticales evolucionan hasta formar simas tubulares o gullies alargados. Los flujos inferiores siguen el cauce y presentan laminadores y galerías de sección irregular, pero consistentes y lo suficientemente compactas como para resistir la carga mecánica sin colapsar. Observaciones de campo sugieren que la cavidad evolucionó ampliando su diámetro inferior mientras los procesos de piping iban colapsando tramos del techo formando simas y tramos tipo gully, en una evolución remontante bajo el barranco de su cabecera. Procesos estos que siguen activos en la actualidad, como lo prueba la existencia de gullies ciegos superiores a lo largo del flanco.

OTRAS CAVIDADES EN EL BARRANCO DEL ABEJAR Y PLANA DE LA CULEBRA

En la proximidad de esta cavidad, sobre las paredes del barranco del Abejar, encontramos en su margen W (derecha) dos pequeñas cuevas (Figuras 06, 16 y 17). Sus bocas (de 1-2 m de diámetro) dan paso a salas más espaciosas (de 5-6 m de diámetro y bóvedas a 2-3 m de altura) formadas por piping. Presentan colapsos de bloques, pequeñas ramificaciones y espeleotemas de yeso, illita y calcita. En este caso no comunican con simas superiores.

El tramo que sigue hacia el N presenta algunas otras pequeñas cavidades y geoformas, tales como: surcos de piping, laberintos de mesocavernas con pilares y columnas, abrigos profundos excavados por erosión en el lado externo de los meandros del cauce, cárcavas con relieves ruiniformes y zonas de colapso con morfología de badlands (Figuras 18 á 20).

La zona de cabecera del barranco del Abejar va atravesando, con frecuencia creciente, estratos intercalados de calizas y margas, formando escalones en el cauce y escarpes verticales en sus paredes laterales (Figuras 21 y 22). En estos escarpes es frecuente el colapso de bloques de roca por el desarrollo de fracturas de descompresión mecánica.

Figura 01. Planicies y relieves tabulares en el extremo Sur de la Bardena Negra.

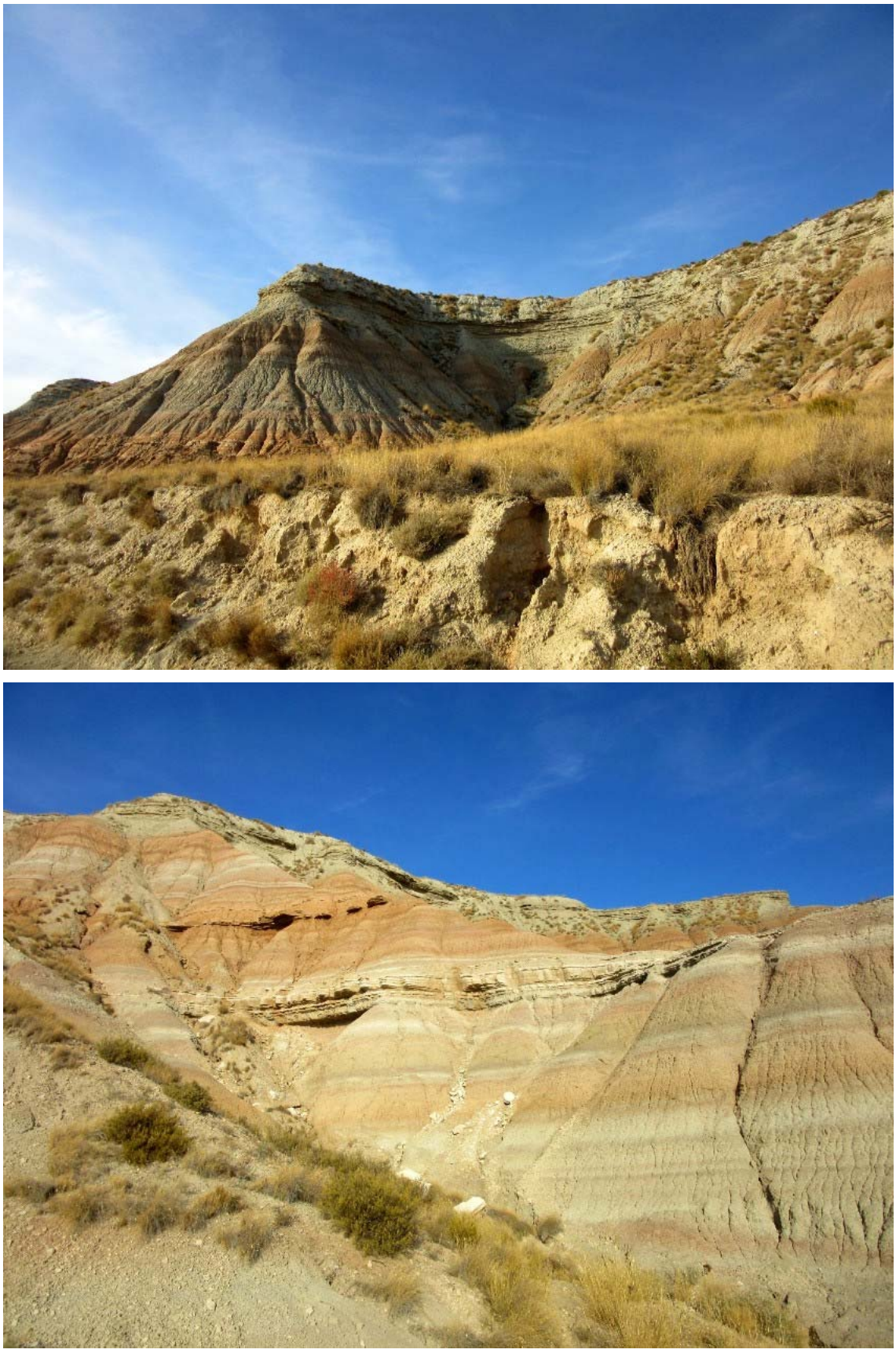


Figura 02. Relieves tabulares, de estratificación horizontal, en arcillas ocres y grises, con intercalaciones espaciadas de estratos duros de caliza, marga o arenisca.

Figura 03. Mesetas y cerros, de caprichosas formas, en materiales arcillosos de la Formación Tudela.

Figura 04. El drenaje en esta región árida se encaja formando cárcavas, cañones entallados y gullies, donde son muy activos los procesos de piping y erosivos, generando cavidades en arcilla a distintas escalas.

Figura 05. Las paredes de los cañones y barrancos, a menudo de más de 10 m de altura, presentan numerosos surcos y pequeñas cavidades en arcilla generadas fundamentalmente por procesos de tubificación o piping. La pequeña boca que se observa en la imagen inferior, de 1 m de diámetro, da paso a una salita más amplia con bóveda a 4 m de altura.

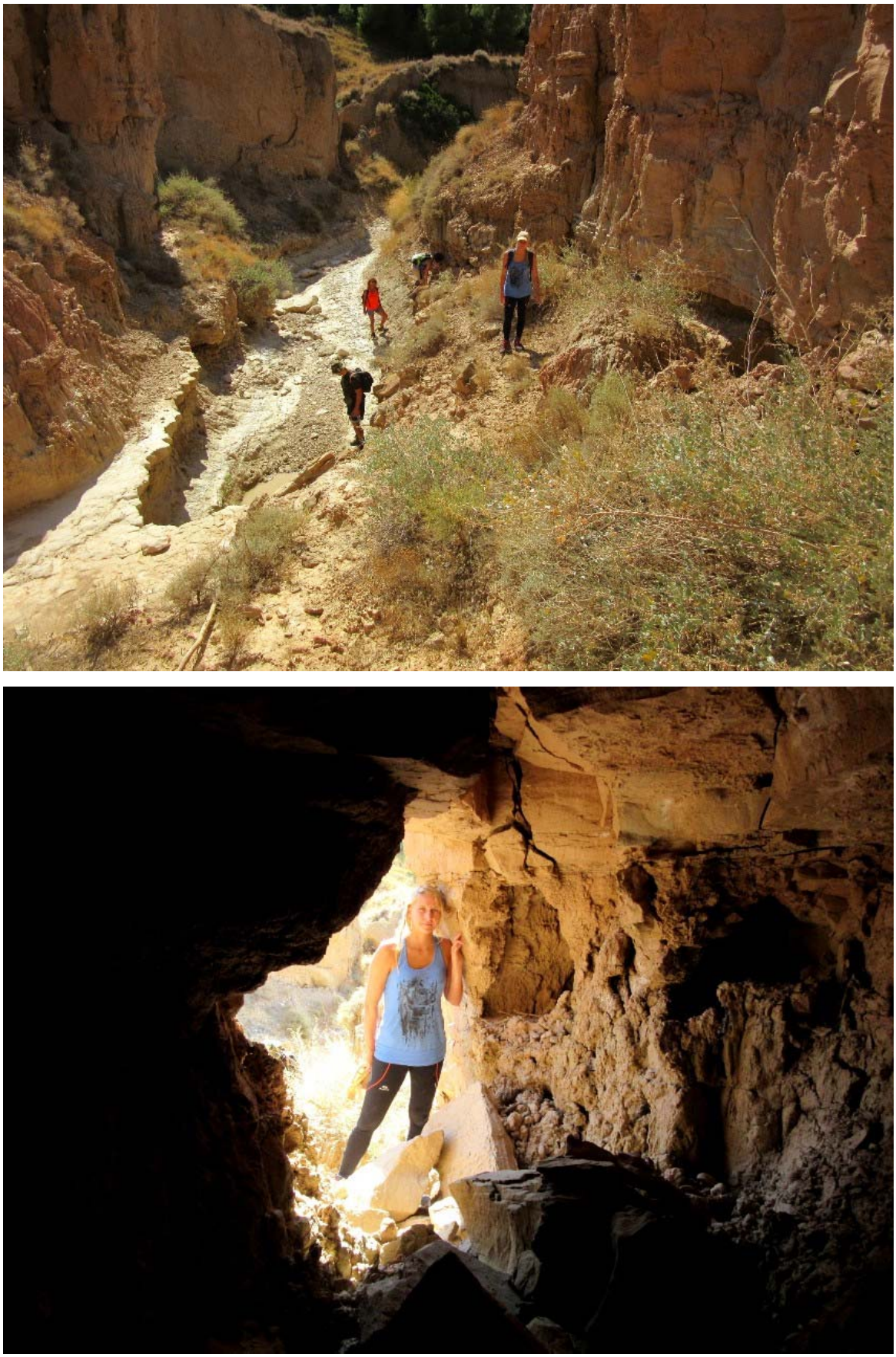


Figura 06. Barranco Norte del Abejar, con pequeñas cuevas en sus paredes laterales. La boca de la imagen da paso a una sala de 5 m de diámetro, con pequeñas ramificaciones y espeleotemas de yeso, illita y calcita.

Figura 07. En los rellenos aluviales-coluviales del barranco Norte del Abejar también se presentan algunas cuevas que forman cortos túneles recortando los meandros del cauce.

Figura 08. La entrada o boca inferior de la Cueva del Abejar se abre en el cauce del barranco del mismo nombre.

Figura 09. Galerías internas de la Cueva del Abejar, de 72 m de desarrollo y +12 m de desnivel. Nótese en el cauce temporal restos vegetales arrastrados por las últimas crecidas.

Figura 10. Cueva del Abejar. Pasos de techo bajo (con cauce temporal) y galería de enlace con la base de las simas que se encuentran a lo largo del tramo superior de la cavidad.

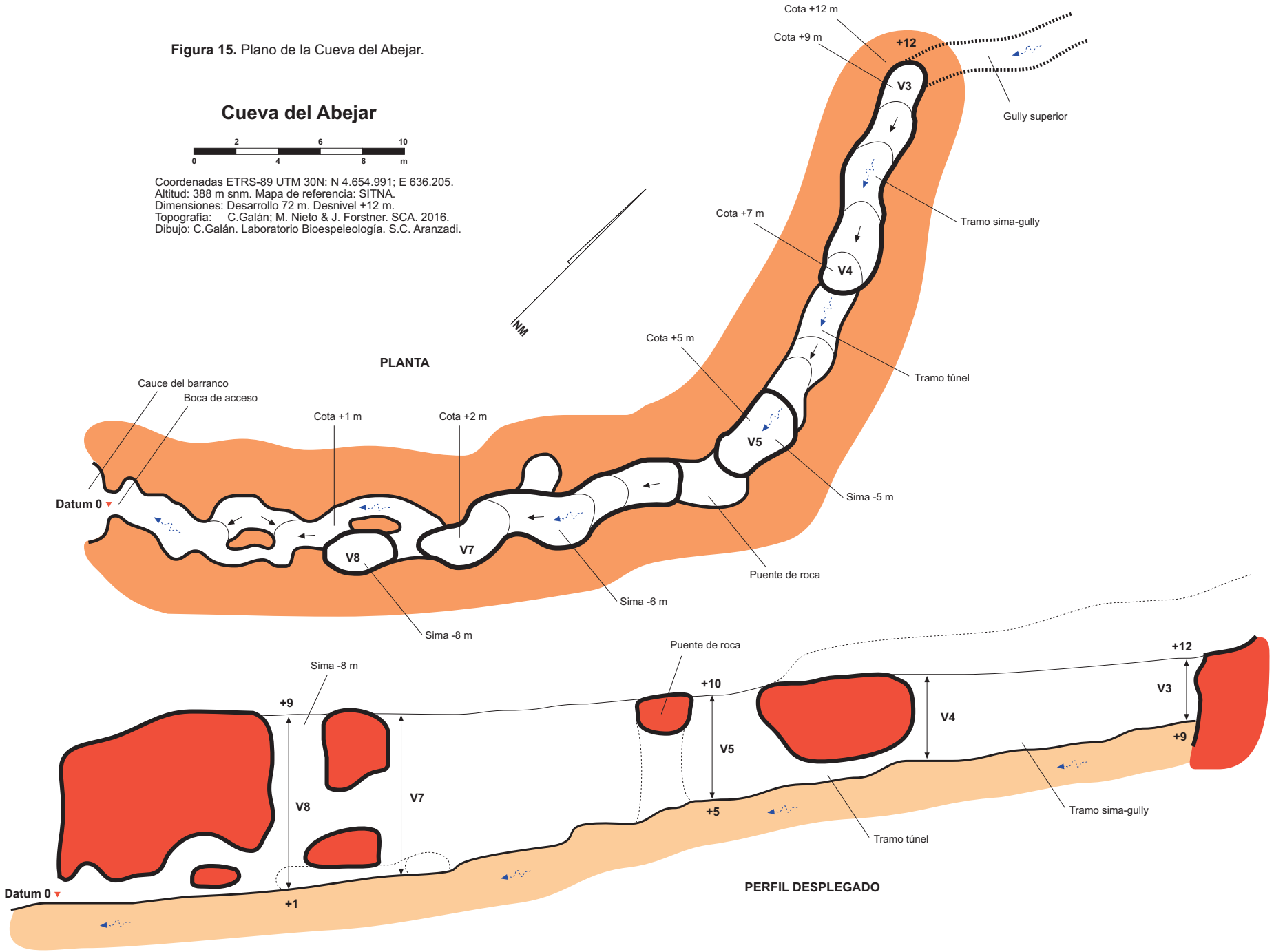
Figura 11. Tramos bajo simas y galería-túnel en el tramo superior de la Cueva del Abejar. Nótese la ocurrencia de arcillas de distintos colores y clastos incluidos en la matriz arcillosa.

Figura 12. Tramo entallado de la sima-gully superior y conducto bajo un puente de roca entre simas adyacentes.

Figura 13. Galerías de la Cueva del Abejar, con finos recubrimientos de espeleotemas blancas constituidas por crecimientos de cristales aciculares de yeso.

Figura 14. Detalles del tramo próximo a la boca inferior de la Cueva del Abejar y continuación del barranco Norte con escalones que recortan estratos delgados de calizas y margas.

Figura 15. Plano de la Cueva del Abejar.



La diferencia de litología, entre los estratos duros y las arcillas, no parecen facilitar la formación de cuevas. En la parte basal de los estratos duros por lo general se forman pequeños techos y abrigos poco profundos, por remoción de las arcillas inferiores, lo cual no forma cavidades sino que propicia el colapso de bloques cúbicos.

En las zonas altas de lomas e interfluvios, entre los barrancos del Abejar (al W) y el de Valdegorrión (al E), y entre los relieves de la Barrera de Clemente y la Plana de La Culebra (al N y S, respectivamente), prospectamos una amplia zona con vegetación de pino carrasco y claros herbáceos. En este recorrido cruzamos y recorrimos tramos de valles y barrancos normales, poco encajados y de débiles pendientes, sin encontrar cavidades ni zonas de sumideros, lo que indica que el drenaje se limita a la escorrentía superficial, sin ocurrencia de infiltración. Ello a su vez refuerza la idea de que los materiales arcillosos de la Formación Tudela son terrenos primariamente impermeables. Es la ocurrencia de los procesos de piping lo que determina que se amplifiquen, extraordinariamente, el agrietamiento, la desagregación de las arcillas, la disolución intergranular, la infiltración y la formación de cavidades, y al parecer ello requiere la existencia de un fuerte gradiente hidráulico y de vacíos próximos o niveles de base locales hacia los cuales puedan drenar subterráneamente los incipientes sistemas subterráneos y sus conductos. Condiciones que se encuentran precisamente en la vecindad de barrancos entallados (Figuras 23 y 24) y, en otras zonas de las Bardenas, en taludes y declives de fuertes pendientes (ver por ejemplo: Galán, 2015).

En el barranco Sur de la Plana de la Culebra encontramos en proporción más escasa muchos otros ejemplos de pequeñas cavidades y geoformas generadas por piping; incluyendo simas del orden de -10 m de desnivel, cortos túneles y cárcavas que perforan los bordes de sus paredes en los tramos más encañonados del barranco (Figuras 26 á 28). Pero sin hallar otras cavidades mayores.

Aparentemente la formación de cavidades en arcillas de la Formación Tudela sólo ocurre o se produce cuando coinciden una suma de condiciones locales (fisiográficas y litológicas), en sectores propicios de fuerte gradiente hidráulico, como en la vecindad de la red de cañones, barrancos y a cortas distancias sobre sus flancos y cabeceras. Los mismos tipos de ejemplos descritos pueden encontrarse a pequeña escala (como miniaturas) en una amplia variedad de relieves, lo que sugiere que se trata de procesos y formas de naturaleza fractal.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A distintas escalas observamos que se repite la ocurrencia de formación de pipes verticales, que canalizan la infiltración de las precipitaciones en profundidad, y de conductos subhorizontales que dirigen luego las aguas hacia los puntos bajos de emergencia, en la base de la red entallada de barrancos y gullies. El desarrollo de estos procesos de piping va transportando partículas y generando canalículos y conductos de diámetros progresivamente mayores, hasta formar galerías y macrocavernas. Resulta claro que existe una variable intervención de la disolución, sobre todo de las sales de sodio en las fases iniciales, lo que desflocula las arcillas y genera pipes.

Las arcillas Terciarias y Holocenas constituyen un material dispersivo con altos valores de SAR (Sodium Adsortion Ratio) y sodio intercambiable, de estructura masiva, pH alcalino (8.3 á 9), y coeficientes de hinchamiento que pueden llegar hasta el 12%. Tanto la capacidad de hinchamiento como la dispersión son factores importantes en el desarrollo de los procesos de piping ya que ambos causan agrietamiento. Los altos valores de SAR y sodio intercambiable definen a estos sedimentos como altamente susceptibles para el desarrollo de los procesos de piping y la razón principal para su ocurrencia (Marin & Desir, 2010; García-Ruiz, 2011).

A medida que se canaliza más agua subterránea, se pasa a un régimen turbulento, que permite la remoción mecánica de gránulos mayores y la ampliación de los conductos, hasta organizar redes locales de drenaje subterráneo que siguen unas líneas preferentes de flujo (Gutiérrez et al, 1997). En el crecimiento volumétrico posterior intervienen sobre todo los procesos de colapso y erosivos. A la vez, por la alternancia de cortas precipitaciones y fases de marcada desecación, se suceden condiciones de retracción y agrietamiento en las arcillas, con otras de hinchamiento y adhesión de las partículas en las galerías excavadas. Los materiales colapsados van siendo removidos por las crecidas hidrológicas, pero la adhesión de las arcillas en las paredes de las galerías permite lograr equilibrios mecánicos que sustentan sus bóvedas.

Puede comprenderse también que para que las aguas infiltradas circulen y desagüen es necesario que exista cierto gradiente hidráulico, como en el karst clásico (Galán, 1991), en este caso determinado por el salto topográfico existente entre la superficie de los flancos y el fondo entallado de los barrancos. La ampliación de los conductos prosigue por erosión del material particulado y por el colapso 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 cañones. Si los procesos persisten llegan a formarse auténticas cuevas con galerías de varias decenas de metros de desarrollo.

Probablemente el aspecto más controversial reside en la asociación y co-evolución de conductos (pipes) y gargantas entalladas (gullies). Se ha dicho que los gullies propician la formación de cuevas, pero de modo inverso es también apreciable que son los procesos de piping y la presencia de cuevas las que generan los gullies.

Figura 16. Remontando hacia la cabecera de cuenca el Barranco Norte del Abejar se encuentran otras cuevas formadas por procesos de piping (y colapsos) sobre los materiales arcillosos de las paredes.

Figura 17. La boca de la imagen anterior (Figura 16) da paso a una sala más espaciosa (de 6 m de diámetro y 2 m de altura), con espeleotemas de yeso y bloques arcillosos de colapso.

Figura 18. Otros tramos del barranco del Abejar presentan numerosas geoformas, con surcos de tubificación, columnas, pilares y laberintos de pequeñas galerías o mesocavernas.

Figura 19. La acción erosiva de las aguas que circulan temporalmente en esta red de barrancos y cañones es importante. A menudo socava la base de las paredes de arcilla, formando abrigos, y produciendo desplomes y colapsos, los cuales resultan removidos en aguas altas por crecidas sucesivas. Muchas cavidades de piping resultan también destruidas de esta forma.

Figura 20. Cárcavas, pequeñas cavidades y relieves ruiniformes en el barranco Norte del Abejar.

Figura 21. En la cabecera de los barrancos aumenta la cobertura de vegetación y los cauces recortan estratos intercalados de caliza en la parte superior de la serie.

Figura 22. Más cerca del tope de las mesetas y cerros son frecuentes los estratos métricos de caliza, marga o arenisca. La erosión basal produce fracturas de descompresión mecánica, que generan escarpes verticales y colapso de bloques. Curiosamente, las diferencias de litología no parecen facilitar la formación de cavidades.

Figura 23. Lomas e interfluvios con vegetación de pino carrasco. Sector entre la cabecera de los barrancos del Abejar y Valdegorrión (Caídas de La Negra). Las zonas altas no parecen propicias para la formación de cuevas.

Figura 24. La formación de cavidades de piping en arcilla parece ser en parte un fenómeno de borde, asociado a la existencia de un fuerte gradiente hidráulico, establecido en la vecindad de las paredes de los barrancos o en flancos muy abruptos. Detalle de las paredes en otro sector del barranco del Abejar.

Figura 25. Prospecciones en el flanco Sur de la Plana de La Culebra. Escarpes en estratos de caliza y paredes con arcillas grises, ocres y rojas.

Figura 26. Barranco Sur de la Plana de La Culebra, con tramos encañonados, pequeñas cavidades y geoformas.

Figura 27. Prospecciones en el barranco Sur de la Plana de La Culebra, con pequeñas cavidades de piping.

Figura 28. Barranco Sur de la Plana de La Culebra, con simas, túneles y cárcavas, que perforan los bordes de las paredes en los tramos encañonados del barranco.

Dentro de esta dinámica erosiva, el retroceso de las cabeceras de los barrancos y gullies se produce principalmente por procesos de piping (Desir et al, 2009). La magnitud y la intensidad de estos procesos serían función del orden del gully. Así, en los tributarios de menor orden la dinámica de retroceso de las cabeceras y la ampliación del cauce por colapsos, piping y socavación basal es mucho más activa que en los tributarios de mayor orden. La secuencia evolutiva normal pasa por un primer estadio erosivo, con predominio de la incisión del fondo y las paredes, continua con la expansión lateral por el colapso de los conductos de piping, y prosigue con otra fase en la cual el retroceso de la cabecera es el proceso dominante (propiciado por el colapso de bloques y vuelcos), que en su fase final serán lavados y exportados. Así, el piping es el mecanismo precursor para el avance del retroceso de las cabeceras y de la ampliación del canal, siendo la densidad y magnitud de los pipes función de las dimensiones y de la distancia al margen del gully.

Nosotros observamos que los conductos de piping tienden a desarrollarse cerca de los gullies y paredes de los barrancos, formando simas o evolucionando por colapso hacia hundimientos con conductos de distintos diámetros. Ocasionalmente, si se generalizan los colapsos, se constituye un relieve caótico que pasa a formar parte de formaciones más extensas de badlands. Para García-Ruíz (2011) los conductos de piping pueden ser tanto una causa como una consecuencia de la evolución de los gullies.

En las zonas estudiadas, la densidad de piping aumenta cerca de los gullies y el piping parece ser el factor controlante de la orientación de los mismos, hasta el punto de que la forma sinuosa o meandriforme de muchos gullies no parece ser resultado de evolución subaérea, sino del colapso de la red de drenaje subterráneo. Muchos gullies muestran festones correspondientes a hundimientos relativamente recientes, de forma que gran parte del retroceso de la cabecera se debe a la erosión remontante, la cual captura colapsos y hace más rápido ese retroceso. A su vez, los procesos de piping remontan y se extienden aguas arriba a medida que progresa el retroceso de las cabeceras.

En algunos casos se forman simas alargadas y gullies ciegos, de manera que se produce un gully por hundimiento de una red subterránea, pero aguas abajo interrumpe su recorrido para continuar fluyendo por vía subsuperficial o a través de mesocavernas. García-Ruíz (2011) se refiere por ejemplo a “cañones de piping” para aludir a galerías que se desploman en gran parte de su trazado, con un canal localmente incidido que aguas arriba termina bruscamente en una pared vertical. La Cueva del Abejar posee rasgos de este tipo, con galerías subterráneas que han experimentado una evolución remontante y se han desplomado en parte de su trazado, formando una serie de simas consecutivas y tramos tipo “cañones de piping”. Por desarrollarse a lo largo de un flanco de cierta pendiente, los mismos procesos de piping se extienden e intensifican hacia su cabecera, capturando el drenaje y formando *de novo* gullies menores a niveles más altos. El proceso de piping genera así redes de drenaje subterráneo, incentiva la formación de cuevas y gullies, que a su vez favorecen la aparición de nuevos conductos. La secuencia de acontecimientos es poco predecible, por su naturaleza fractal, propia de sistemas complejos.

Nuestra principal conclusión es que la formación de cavidades en arcilla, considerada muy rara a nivel mundial, está ampliamente extendida en la región de las Bardenas, con ejemplos notables a muy distintas escalas. Aunque predominan las cuevas de modestas o pequeñas dimensiones, en comparación con el karst clásico en caliza, nuestras prospecciones están revelando que también se encuentran cuevas y simas mayores, con interesantes rasgos, espeleotemas y geoformas.

BIBLIOGRAFIA

Desir, G.; C. Marín & M. Gutiérrez. 2009. Influencia de los procesos de sofusión (Piping) en la evolución del modelado. Bardenas Reales (Navarra). Congr. Cientif. Univ. Murcia, Cong. Internac. sobre Desertificación. Topic 2: Soil erosion and desertification: 223-226.

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. 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.; M. Nieto & J. Fortsner. 2016. Exploración de nuevas cavidades en las Caídas de La Negra (Bardena Negra). Publ. Dpto. Espeleol. S.C. Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 34 pp.

García-Ruiz, J.M. 2011. Una revisión de los procesos de sofusión o piping en España. Cuadernos de Investigación Geográfica, Universidad de La Rioja, 37(1): 7-14.

Gutiérrez, M.: Sancho, C.; Benito, G; Sirvent, J. & Desir, G. 1997. Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro Basin, NE Spain. Geomorphology, 20: 237-253.

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.

Marín, C. & G. Desir. 2010. Procesos de erosión en una zona de clima semiárido de la depresión del Ebro (Bardenas Reales, NE de España). Rev. C. & G., 24 (3-4), 63-72.

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.