

NOTA SOBRE PROCESOS DE TUBIFICACIÓN, CUEVAS Y GEOFORMAS EN LA BARDENA BLANCA.
Note about piping process, caves and geoforms in the White Bardena.



Carlos GALAN; José M. RIVAS; Marian NIETO & Juliane FORSTNER.
Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi. Agosto 2016.

NOTA SOBRE PROCESOS DE TUBIFICACIÓN, CUEVAS Y GEOFORMAS EN LA BARDENA BLANCA.

NOTE ABOUT PIPING PROCESS, CAVES AND GEOFORMS IN THE WHITE BARDENA.

Carlos GALÁN; José M. RIVAS; Marian NIETO & Juliane FORSTNER.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Agosto 2016.

RESUMEN

Las cuevas en arcilla son poco comunes a nivel mundial. Su génesis resulta de interés en Karstología por producirse por procesos de tubificación en materiales inconsolidados y rocas poco solubles. Sin embargo, en la región de Las Bardenas existe un alto número de cavidades en arcilla, incluyendo algunos de los mayores sistemas de cuevas conocidos en esta litología.

En esta nota exponemos datos sobre los procesos de tubificación que ocurren en arcillas Holocenas en un sector de la planicie de la Bardena Blanca, y que están estrechamente asociados a la formación y evolución de cárcavas y pequeños cañones. En torno a esta red dendrítica de barrancos encajados, se forman miles de arcos y puentes de roca, túneles, simas y cuevas en arcilla, en general de escaso desarrollo. El drenaje subterráneo tiene como nivel de base local el fondo de los barrancos. Pero la tubificación puede actuar de distintos modos según la litología, topografía y otros rasgos de los materiales arcillosos. La proliferación de cavidades a distintos niveles en las paredes de los barrancos contribuye a su vez a la erosión remontante de la red de drenaje epígeo, generando una morfología de badlands, con depresiones, simas y colapsos, a menudo en continuidad. El trabajo describe e ilustra los ejemplos encontrados.

Palabras clave: Karstología, Geomorfología, Hidrogeología, Tubificación, Cuevas en arcilla, Geoformas.

ABSTRACT

Caves in clay are uncommon worldwide. Its genesis is of interest in Karstology by occur by piping processes in unconsolidated materials and poorly soluble rocks. However, in the region of Las Bardenas there are a high number of cavities in clay, including some of the largest known cave systems in this lithology.

In this paper we present data on piping processes occurring in Holocene clays in a sector of the plain of the Bardena Blanca, and which are closely associated with the formation and evolution of gullies and small canyons. Around this dendrite network of embedded gullies, thousands of arches and rock bridges, tunnels, chasms and caves in clay are formed, generally of scarce development. The underground drainage has as local base level the bottom of the gullies. Proliferation of piping caves at different levels on the walls of the ravines in turn contributes to eroding headward of epigeous drainage network, generating morphology of badlands, with depressions, potholes and collapses, often in continuity. The paper describes and illustrates the examples found.

Keywords: Karstology, Geomorphology, Hydrogeology, Piping, Caves in clay, Geoforms.

INTRODUCCIÓN

Diversas exploraciones efectuadas en años recientes en las Bardenas (SE de Navarra) han dado lugar al hallazgo de numerosos sistemas de simas y cuevas en arcilla, los mayores de ellos en materiales arcillosos de la Formación Tudela (de edad Mioceno), en la Bardena Negra, situada al Sur. Pero también se encuentran múltiples sistemas de cavidades, de moderadas dimensiones, en las arcillas y limos que ocupan las planicies inferiores formadas durante el Holoceno en la Bardena Blanca, situada al Norte.

Este trabajo es una continuación de los anteriores y se basa en las prospecciones efectuadas en el sector de la Estroza, en la planicie de la Bardena Blanca. El sector posee una red entallada de drenaje temporal, donde amplios barrancos tienen una red secundaria de gargantas y pequeños cañones. En la vecindad de las paredes verticales de los mismos, por procesos subterráneos de tubificación o piping, se desarrollan infinidad de pequeñas simas, cuevas, túneles, arcos y puentes de roca, con una gran diversidad de geoformas, así como zonas caóticas con hundimientos y colapsos, que crean un paisaje distintivo de badlands en materiales arcillosos.

El área de trabajo permite observar ejemplos a distintas escalas, desde macro a microformas. Particularmente, el desarrollo de sistemas de pequeños conductos (mesocavernas) y surcos menores permite ver y apreciar como actúa el proceso de piping a distintas escalas y en distintas situaciones, aportando de este modo datos adicionales para comprender los procesos erosivos y la formación de cavidades o espeleogénesis en esta peculiar litología, que comprende básicamente materiales arcillosos.

La geología y geomorfología de las Bardenas ha sido objeto de múltiples descripciones y publicaciones, pero pocas de ellas han estudiado los procesos de karstificación y formación de cavidades. Nuestra nota tiene un enfoque espeleológico. Pero además de describir nuevos ejemplos de cavidades subterráneas, aporta datos sobre los procesos erosivos y de piping que ocurren en arcilla, lo cual facilita comprender la evolución que experimenta la red de cárcavas y cañones, así como otros rasgos geomorfológicos de conjunto.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos presentados son el resultado de prospecciones efectuadas durante 2016. Se utilizaron las técnicas habituales en espeleología, con uso de cuerdas, frontales con iluminación de Leds y equipo topográfico Suunto. Algunas muestras de roca fueron examinadas en laboratorio bajo microscopio binocular Nikon. Las cavidades halladas y los principales rasgos geomorfológicos son ilustrados con fotografía digital.

RESULTADOS

CONTEXTO GENERAL

La zona de estudio se localiza en un área de 2 km² en la Bardena Blanca, entre el Barranco Grande (a 295 m snm de altitud) y la base (a 330 m snm) de la meseta de La Estroza (463 m snm). Datos generales sobre los rasgos generales y cavidades en las Bardenas han sido aportados en trabajos previos (Galán, 2015; Galán & Nieto, 2015; Galán et al, 2015, 2016).

La región formó parte de una cuenca endorreica durante el Terciario, hasta que el río Ebro labró su paso a través de la cadena costera catalana para conectar con el Mediterráneo. La cuenca endorreica comenzó a formarse durante el Eoceno y pasó a ser exorreica en el Mioceno final (Riba, 1964; Salvany, 1989). Durante este lapso se rellenó de sedimentos fluvio-lacustres procedentes de la elevación de la cadena Pirenaica, al N, pero también recibió aportes de la cadena Ibérica, situada al Sur. A partir del Plioceno la cuenca comienza a erosionarse. Durante el Cuaternario los materiales Terciarios, fundamentalmente arcillosos y margosos, siguen siendo erosionados, vaciando gran parte de la cuenca y originando relieves tabulares aislados, de formas caprichosas. Si bien toda la cuenca posee climas continentales áridos, la Bardena Blanca es la que ofrece un aspecto más desolado y desértico.

En la actualidad se distingue una zona plana y deprimida, la gran planicie central, que siguen de N a S el barranco Grande y el de los Hermanos, a 280 m de altitud, y que separa la Bardena Blanca, al N, de la Bardena Negra, al Sur. La Bardena Blanca constituye una depresión erosiva amplia y compleja, teniendo las más curiosas y aisladas formas del relieve, con mesetas que alcanzan 490 m de altitud. La Bardena Negra ocupa la porción meridional, con relieves de mayores altitudes, mayor cantidad de vegetación, y ofrece formas de erosión más comunes, propias de las comarcas Terciarias peninsulares. En lo que sigue nos referiremos exclusivamente a la Bardena Blanca.

Geológicamente, la parte basal, que aflora al W, está constituida por una espesa secuencia de arcillas y yesos (Formación Lerín, de edad Mioceno), a la que suprayace una secuencia margo-arcillosa sensiblemente horizontal (Formación Tudela, también Miocena). Esta posee algunos niveles de yeso, principalmente en su parte inferior, pero fundamentalmente está formada por potentes conjuntos de sedimentos arcillosos, térreos, de potencia decamétrica, entre los cuales se intercalan otros margosos, areniscosos, y en sus zonas más altas, de calizas y margas, pero separados unos de otros en capas de escasa potencia. Estos materiales están revestidos por glaciares de cobertera del Pleistoceno (cantos y gravas con abundante matriz limo-arcillosa) y sedimentos Holocenos arcillosos, menos compactos, en las zonas planas inferiores.

La Formación Tudela está constituida por arcillas limosas grises y ocreas, en ocasiones rojizas. Aparecen con intercalaciones de capas de caliza y margocaliza, aunque también pueden intercalarse capas de arenisca y limolita, en tramos de espesor decimétrico a métrico. A lo largo del Pleistoceno se formaron diversos glaciares de piedemonte, encajándose los más recientes sobre los anteriores. Estos glaciares de cobertera son depósitos poco consistentes formados por limos y arcillas con clastos angulosos de caliza, gravas y cantos rodados, de escasa cementación y potencia inferior a 2 m.

Durante el Holoceno se depositan limos, arcillas, arenas y gravas de origen mixto (aluvial-coluviol). Predominan en ellos los términos lutíticos con delgadas hiladas de cantos de caliza y arenisca, así como niveles arenosos. Su espesor varía de 2 a 5 m. En los fondos de valle de barrancos y arroyos predominan arcillas y lutitas grises y ocreas, también con clastos de diferentes tamaños y naturaleza, incluso bloques. En menor medida, también se observan niveles de arenas y láminas de yeso. Su potencia es poco discernible, pero se estima que localmente puede superar los 15 m.

La disposición subhorizontal de estos sedimentos, con capas de distinta dureza (y distinta resistencia a la erosión), ha dado lugar a un relieve tabular de mesetas, con una serie de superficies escalonadas, replanos y resaltes estructurales que marcan los niveles más competentes. Los niveles duros permiten configurar la estructura regional, consistente en una sucesión tabular poco deformada, con un ligero basculamiento hacia el S y SE (Castiella et al, 1978).

Las formas erosivas son muy frecuentes, dado el predominio de sedimentos blandos y los rasgos de un clima semiárido, lo que favorece el desarrollo de la incisión y la formación de aristas y surcos sobre los sedimentos. Los barrancos de arroyada y las cárcavas predominan en las zonas planas Holocenas y al pie de los escarpes. La erosión, muy activa en las Bardenas, determina la progresiva excavación de barrancos, su entallamiento vertical y excavación remontante hacia sus cabeceras. Estudios recientes para cuantificar las tasas de erosión en las Bardenas señalan que la pérdida de materiales es muy elevada. Estas pérdidas alcanzan 32 Tm/Ha/año (toneladas métricas por hectárea al año) para materiales Terciarios y 77,2 Tm/Ha/año para materiales Holocenos (Desir & Marín, 2007). De ello se desprende que la erosión es muy importante y la evolución del paisaje está controlada por la litología y las características climáticas, siendo a su vez estas últimas las que condicionan los procesos de erosión. La mayor parte de la erosión y remoción de materiales en las planicies actúa a través de la formación de barrancos y cañones entallados o gullies, generados precisamente por procesos de tubificación o piping.

El clima en la región es árido a desértico, con una precipitación media anual de 350 mm y una evapotranspiración potencial de 790 mm. La temperatura media anual es de 13°C, con máximos diarios que alcanzan 40-50°C en verano y mínimos de -5°C en invierno, con frecuentes heladas. Las precipitaciones medias mensuales oscilan entre 10 y 55 mm, con dos máximos anuales (a finales de primavera y comienzos del otoño). Durante estos máximos las lluvias son de baja intensidad (lloviznas de carácter ciclónico), por lo que su capacidad erosiva es baja. Mientras el resto del año, aunque las precipitaciones son menores, las lluvias son de elevada intensidad y corta duración (carácter tormentoso), por lo que poseen una alta capacidad erosiva (Marín & Desir, 2010).

La distribución de las precipitaciones junto a la litología de los materiales son los factores principales que controlan la erosión. Sin embargo, otros factores, como la pendiente y formas del relieve, condicionan la escorrentía y la infiltración. Con fuertes pendientes la escorrentía es máxima y dificulta la infiltración, lo que inhibe el desarrollo de los procesos de tubificación o piping. Mientras que en las planicies y zonas de menor pendiente, la infiltración es mayor y se desarrollan intensamente los procesos de piping y formación de cavidades.

En el área de estudio predomina una secuencia de arcillas y limos ocre y grises, poco litificados, de edad Holoceno. Estos materiales proceden del lavado de las arcillas terciarias de los cerros circundantes. Al estar estos materiales arcillosos menos litificados, el drenaje temporal se encaja en una red de barrancos entallados de fondo plano, de dimensiones variables, que pueden alcanzar 5 a 20 m de profundidad y anchura y desarrollos de más de 10 km de longitud. Estos pueden exportar anualmente hasta 12 Hm³ de sedimentos al río Ebro (Desir & Marín, 2007). Localmente, en torno a los barrancos, pueden desarrollarse redes de gargantas menores o gullies, de escasa anchura pero profundamente entallados, formados por procesos de piping.

LITOLOGÍA

Los materiales arcillosos Terciarios y Holocenos constituyen un material ligeramente dispersivo, de estructura masiva, pH alcalino (8.3 a 9), conductividad eléctrica alta (3 a 5 mS), ausencia casi total de materia orgánica, altos valores de SAR (Sodium Adsorption Ratio) y ESP (Exchangeable Sodium Percentage), y coeficientes de hinchamiento que pueden llegar hasta el 12%. Mineralógicamente estos materiales presentan un alto contenido en arcillas (30%) y calcita (41%), y algo menos de cuarzo (24%). Los minerales de la arcilla identificados han sido illita (82-86%), clorita (9-16%) y trazas de caolinita.

Tanto la capacidad de hinchamiento de estos materiales como la dispersión son factores importantes en el desarrollo de los distintos procesos de erosión ya que ambos causan agrietamiento. Las arcillas y limos Holocenos tienen composiciones similares a los Terciarios, un índice de dispersión medio y altos valores de SAR y ESP. El pH, conductividad y contenido en materia orgánica son similares en ambos casos. Se han reconocido ligeras diferencias entre distintos niveles, pero sin mayor significación. Los altos valores de SAR y sodio intercambiable sugieren que en estos sedimentos resulta fácil la génesis de procesos de piping (Marín & Desir, 2010).

La presencia de arcillas expansivas y elevados valores de SAR y ESP son suficientes para definir un lugar como altamente susceptible al piping y la razón principal para su ocurrencia (García-Ruiz, 2011). Cuando el sodio representa un alto porcentaje del total de cationes puede producirse piping y colapsos de gran envergadura. El piping en estos casos coincide con materiales poco coherentes, con alto contenido en 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 (Gutiérrez et al, 1997). Las arcillas con elevadas tasas de expansión y contracción, aumentan la susceptibilidad a la desecación, agrietamiento e infiltración. Sin embargo, no parecen ser estos solos los valores determinantes. Para Desir & Marín (2007), en las laderas de fuerte pendiente, la escorrentía tiende a fluir en superficie, dificultando la acción de los procesos de piping.



Figura 01. El árido paisaje del área de estudio en la Bardena Blanca se extiende desde la base de la meseta de La Estroza hasta el Barranco Grande, con una red de cañones afluentes. Nótese las eflorescencias salinas y bocas de cavidades en los escarpes.



Figura 02. Tras recientes lluvias a fin de primavera el Barranco Grande conserva charcas de agua, con circulación intermitente, y numerosos recubrimientos de sales sobre las orillas del cauce.



Figura 03. Parte central del Barranco Grande, con charcas de agua, juncos, suelos de desecación poligonales y eflorescencias salinas.



Figura 04. Litología de materiales arcillosos, grises y ocre, con nivelitos de margas, cuevas de tubificación y chimeneas de las hadas, coronadas por un estrato de margas.



Figura 05. La planicie de La Estroza presenta barrancos entallados, que se van subdividiendo hacia sus cabeceras en una red dendrítica de gargantas menores o gullies. En torno a ellas tienen gran desarrollo los procesos de piping y formación de cavidades en arcilla.



Figura 06. Numerosos arcos y puentes de roca, así como cuevas de moderadas dimensiones, perforan los bordes de los escarpes, a veces a varios niveles, aprovechando la presencia de estratos más resistentes.



Figura 07. Cuevas con galerías internas en oscuridad jalonan la base de las paredes de los gullies. A menudo presentan cauces que evidencian circulaciones hídricas de carácter temporal.



Figura 08. Pequeñas cuevas en comunicación con claraboyas y laminadores con cauces surgentes.



Figura 09. El retroceso de las paredes de los barrancos genera también múltiples geoformas, tales como torres de roca, chimeneas de las hadas, elevaciones y surcos con superficies agrietadas y endurecidas por sales.



Figura 10. Geoformas formadas por fluidificación de las arcillas. Bajo condiciones alternas de humectación y desecación las arcillas dispersivas ricas en sales de sodio forman filigranas y espeleotemas de illita, tanto en el interior de las cavidades como en las paredes externas de los gullies, como muestran las imágenes.



Figura 11. Gargantas entalladas o gullies, recorridas por cauces temporales y con gran número de cavidades.



Figura 12. Sima de -12 m de desnivel, con galería subterránea que drena hacia el fondo de un gully próximo. Algunas de estas cavidades tienen desarrollos de varias decenas de metros.



Figura 13. Base amplia de una sima de 10 m y galería de comunicación con el fondo del gully.



Figura 14. Las cavidades en arcilla más frecuentes en este sector son simas con galerías inferiores en comunicación con el fondo de barrancos y gullies.



Figura 15. Otra cueva ascendente que finaliza en sima-claraboya en comunicación con superficie. Nótese el ambiente seco y polvoriento, con emergencia de raíces.



Figura 16. La cueva de la figura anterior comunica con la base de una sima de amplio diámetro, cuyo fondo presenta depresiones adicionales. Apparently se ha formado por coalescencia de los conductos tubulares verticales de varias simas.



Figura 17. Cuevas y arcos de roca a varios niveles en las paredes de un cañón, producto de la presencia de estratos delgados de marga-caliza intercalados en la secuencia arcillosa.



Figura 18. Otra cavidad, ligeramente ascendente, en la base de un gully. Se prolonga en mesocavernas menores. Los hoyuelos en el sedimento de entrada son hechos por pequeñas aves, para asearse.



Figura 19. Los desplomes y colapsos por socavamiento de las paredes en la base de los gullies a veces obstruyen el paso, o resultan perforados, formando túneles y cuevas de recubrimiento.



Figura 20. Gully con tramos estrechos, entallados, donde se forman arcos, puentes de roca y cortos túneles.



Figura 21. Cavidades de varias decenas de metros de desarrollo intercaladas a lo largo del cauce de barrancos. Una prueba de la continuidad entre gullies y cuevas, o como el desplome del techo de cuevas genera gullies.



Figura 22. Boca inferior y superior de otra cueva, de algo más de 20 m, en el fondo del cauce de un gully.



Figura 23. Los procesos de piping generan también numerosos conductos, arcos y puentes de roca, escalonados en las repisas y paredes de los gullies.



Figura 24. Otros ejemplos de pequeñas cavidades, arcos y puentes de roca. Su profusión en algunos sectores es notable. Puede apreciarse también la ocurrencia de pipes (conductos de piping) de distintos diámetros.

CAVIDADES Y GEOFORMAS

El área de estudio corresponde a una planicie con materiales arcillosos Holocenos, entallada por gullies. Aunque estos materiales son de similar litología que las arcillas Miocenas, resultan ser algo más porosos y menos coherentes. Su disposición horizontal facilita que el drenaje se encaje formando una red de gargantas y gullies, con paredes verticales. Estas forman una red dendrítica que ocupa considerables extensiones y actúa como afluente de los barrancos más grandes. Ambos son de fondo plano o subhorizontales. Y en la vecindad de sus paredes los procesos de piping alcanzan gran profusión, con formación de cierto número de simas y cuevas penetrables, mesocavernas (galerías de diámetros inferiores a 20 cm), túneles, y numerosos arcos y puentes de roca. Todo ello prueba que existe infiltración vertical en estos materiales y flujos subterráneos subhorizontales que desaguan hacia los niveles de base locales constituidos por el fondo de los barrancos (Figuras 1 á 24).

El proceso de piping en estas arcillas se inicia por la formación de agrietamientos en el suelo superior, asociados a la expansión y contracción de las arcillas bajo las condiciones meteorológicas alternas de humectación y desecamiento. 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 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 de la planicie y el fondo entallado de cárcavas y barrancos, que llega a alcanzar desniveles de 5 á 20 m. La ampliación de los conductos prosigue por erosión del material particulado (por los fuertes contrastes pluviométricos), 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 varias decenas de metros de desarrollo.

En la vecindad de estos gullies o gargantas entalladas es donde se da la mayor profusión de cavidades. Predominan las simas cercanas al borde, de trazado vertical, y que pueden contener un fondo de bloques arcillosos colapsados y sedimentos finos, que obstruyen la continuación, pero también pueden proseguir en rampa en galerías tubulares que terminan conectando con cuevas horizontales inferiores, en la base de los barrancos hacia los cuales se dirige su drenaje temporal. Estas cavidades pueden alcanzar más de 20 m de desarrollo. En las paredes de algunos barrancos se encuentran fragmentos de tubos verticales residuales, que al progresar el retroceso de la pared por erosión remontante, resultan perforados y parcial o totalmente colapsados, generando gran número de arcos y puentes de roca.

El caso inverso es la ocurrencia de cuevas (similares a las anteriores) que se extienden desde la base del barranco, sin comunicar con superficie, o bien con chimeneas o claraboyas abiertas a la superficie. Las hay de trazado en L (con la rama de acceso horizontal) y otras con galerías oblicuas, con pendiente ascendente. Generalmente forman túneles, abiertos en sus extremos, y pueden encontrarse ejemplos que alcanzan 60 m de desarrollo, con galerías en oscuridad total.

Existen también cuevas de recubrimiento, con tramos techados por bloques de desprendimiento. El desmoronamiento de tramos de la parte superior de las paredes de los cañones puede techar la zona inferior del conducto, dejando un tramo de bloques acuñaos que forman el techo, o bien resultan perforados por la actividad hídrica basal, formando desde pequeños túneles hasta galerías sinuosas de varias decenas de metros de largo. De igual modo son frecuentes perforaciones entre los meandros de los gullies o en aristas residuales de cañones más amplios, los cuales dejan cavidades en forma de cortos túneles, arcos y puentes de roca, que en ocasiones pueden alcanzar amplios diámetros.

Encontramos también ejemplos de simas que forman ranuras alargadas, con bocas de 1 m de ancho por varios metros de largo, de hasta -10 m de desnivel. Su base es ligeramente más amplia y suele prolongarse en laminadores estrechos y mesocavernas, generalmente más anchas que altas, con huellas evidentes de circulación temporal de agua. La morfología de estas cavidades sugiere que existe un flujo subterráneo subhorizontal que forma cuevas primero y evoluciona después ampliándose en sentido vertical hasta formar gullies. En forma inversa hemos encontrado pequeñas cuevas surgentes que a los pocos metros prosiguen como laminadores de morfología similar a la hallada en la base de las simas en ranura.

La cabecera de muchos gullies con frecuencia se interrumpe abruptamente, dando paso a zonas caóticas con morfología de badlands: depresiones con colapsos y zonas laterales con cárcavas, desmoronamientos y pequeños conductos de piping. En superficie la planicie también presenta una gran diversidad de geoformas: zonas alomadas con surcos y entalladuras, chimeneas de las hadas, pequeñas lomas con superficies endurecidas por la eflorescencia de sales y agrietadas por desecación en retículos de tipo popcorn, caprock, formas cónicas y formas botroidales (Figuras 25 á 44).

El desarrollo acumulado de galerías en el total de 15 cuevas exploradas en este sector (de 2 km²) suma algo más de 200 m de galerías subterráneas. A lo que se agrega una red mucho mayor de mesocavernas y pequeños conductos. Por lo que se trata de una red extensa de drenaje subterráneo, asociada (pero limitada a la vecindad) de una red dendrítica de barrancos y cañones, que comprende en la región decenas de kilómetros de desarrollo.

KARSTIFICACIÓN Y PIPING

La remoción intergranular de partículas puede producir tanto grandes como pequeños conductos y puede involucrar tanto rocas poco solubles como materiales inconsolidados. La utilización del término karst o pseudokarst para este tipo de cavidades y terrenos es controversial. A menudo hidrólogos, geomorfólogos y karstólogos utilizan diferentes terminologías, aunque sus conclusiones son muy similares (Higgins & Coates, 1990). El enfoque tradicional de los geólogos es expresado claramente por Parker et al. (1990), mientras que el punto de vista en hidrología no-kárstica es explicado con elegancia por Dunne (1990). No obstante, el énfasis de Dunne se centra en el movimiento del agua subterránea a través de microporos y vacíos intergranulares en el medio edáfico, mientras los conceptos de Parker involucran depresiones, cuevas y conductos mayores, por lo que resultan más congruentes con las corrientes actuales en karstología y espeleogénesis (Halliday, 2004).

En la Bardena Blanca, las cuevas se desarrollan en materiales arcillosos de consistencia variable, relacionados con una red de barrancos entallados y gullies, así como depresiones y colapsos que generan una morfología de badlands: zonas desnudas, de escasa pendiente, intrincadamente disecadas por una escorrentía de flujo intermitente, con estrechos interfluvios y superficies con resistentes caprock (roca sello), donde la expansión y la contracción de las arcillas con la alternancia de las lluvias y sequías repetidamente cubre y destapa pequeños conductos formados por piping (Mears, 1968).

El proceso de piping en arcilla clásicamente 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 (Striebel & Schäferjohann, 1997), como la prueba la eflorescencia de sales de sodio en superficie y la ocurrencia de espeleotemas en las cuevas. 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, cuesta arriba o cuesta abajo, y pueden desarrollarse trenzados 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 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. Debido a que muchos conductos son de corta duración, sólo algunos persisten el tiempo suficiente para alcanzar el tamaño de cuevas.

Las cavidades encontradas están asociadas y en la vecindad de gullies, que son ranuras profundas y estrechas, serpenteantes, con paredes verticales, y suelen ser recorridas por arroyos temporales. Algunos cauces ciegos se interrumpen por estrechos sumideros de tubificación o poseen cabeceras cortadas por paredes con entalladuras verticales tubulares. En otros casos, grandes bloques desmoronados se acuñan entre las paredes y forman los techos de cuevas de recubrimiento que pueden alcanzar decenas de metros de largo. No son tampoco infrecuentes las cuevas a varios niveles con múltiples entradas y colapsos. En condiciones atmosféricas normales, las galerías de las cuevas constituyen ambientes secos y polvorientos, donde son frecuentes afloramientos de raíces en sus paredes y techos, que a su vez pueden guiar y facilitar la infiltración a pequeña escala.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este sector de la Bardena Blanca existe un considerable número de cavidades en arcilla, formadas esencialmente por procesos de piping y erosión, aunque actúa la disolución a menor escala. Las cavidades exploradas constituyen sólo una fracción del total regional, que incluye una extensa red kilométrica de barrancos y gullies, en los que sin duda deben existir muchas otras cavidades, incluso con mayores desarrollos. No obstante, estas cavidades y relieves, tienen una duración efímera en el tiempo a escala geológica: en sólo unas pocas décadas pueden formarse nuevas cavidades y destruirse o colapsar otras anteriores, ya que la erosión normal en estos terrenos arcillosos poco litificados y ricos en sales es muy rápida.

Cabe destacar que en las cavidades de mayor desarrollo de galerías y mayores diámetros, las paredes resultan bastante compactas, como si la ventilación de su atmósfera 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 tomadas de las arcillas de estas paredes, observadas al microscopio binocular, exponen una estrecha imbricación de las partículas arcillosas, con menor porosidad aparente que las arcillas que afloran en 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.



Figura 25. La cabecera de muchos barrancos a menudo presenta una morfología de badlands, con colapsos, depresiones, pequeñas cuevas y gullies, que forman relieves caóticos.



Figura 26. Sobre la planicie, en la cabecera de gullies y barrancos, ocurren los mismos procesos de piping, generando -a distintas escalas- simas, cuevas y gullies, cuya evolución generará nuevas gargantas.



Figura 27. Diversidad de geofomas en superficie: pequeñas lomas residuales, con agrietamientos y surcos menores. Al fondo, la meseta de La Estroza.



Figura 28. Zona de lomas con surcos, las cuales separan áreas de badlands, sobre la planicie. Muchas de ellas poseen superficies endurecidas por sales, con morfologías de popcorns.



Figura 29. Áreas de badlands, con diversidad de geofomas, entre ellas formas cónicas y pequeñas torres.



Figura 30. Geoformas cónicas y guijarros de distinta litología derivados del glacis de acumulación.



Figura 31. Zona de badlands con pináculos, donde también se encuentran pequeñas cuevas y gullies, a diferentes escalas.



Figura 32. Extensas zonas de aristas y surcos, con diversidad de geoformas.



Figura 33. La zona basal del flanco de la meseta presenta diversas geoformas, con profusión de recubrimientos salinos, que han percolado hacia superficie a partir de las aguas porales que circulan entre las arcillas.



Figura 34. Las aguas de escorrentía que descienden de los flancos de la meseta de la Estroza, al alcanzar la planicie, forman surcos y cárcavas, que progresivamente excavan cavidades y gullies.



Figura 35. Pequeñas cuevas en zona de badlands, en la cabecera de las redes de gullies.



Figura 36. Multiplicidad de pequeñas cavidades y geofomas en zona de badlands.



Figura 37. Los deslizamientos, colapsos y vuelcos del material de las paredes amplían los barrancos. Estos rellenos luego son removidos por la circulación de las aguas en épocas lluviosas.



Figura 38. Cuevas colgadas a distintos niveles y claraboyas escalonadas sobre un conducto subvertical.



Figura 39. Cauce de un barranco más amplio, con intercalaciones de estratos delgados de margas, y cauce con guijarros, entre los que se encuentran rosetas de cuarzo y láminas de yeso.



Figura 40. En algunos tramos las paredes de los gullies presentan numerosas láminas de yeso incluidas en la matriz arcillosa (flechas rojas, imagen superior), a veces formando tramas poligonales (imagen inferior).



Figura 41. Cauce de un gully sobre un estrato delgado de marga-caliza, cuarteado, que luego es excavado formando aceras en relieve. Las intercalaciones de calizas y margas suelen formar repisas en las paredes, con cavidades a varios niveles.



Figura 42. Intercalaciones de estratos delgados de margas en la serie arcillosa. Su erosión y colapso genera gravas, guijarros y bloques angulosos poco rodados, de más difícil remoción que las arcillas.



Figura 43. La red de barrancos y gullies que entalla la planicie tiene desarrollos kilométricos, con infinidad de cavidades y geformas en arcillas ricas en sales de sodio, de las que sólo conocemos una pequeña fracción.



Figura 44. Un extenso territorio con sistemas de cavidades en arcilla, a distintas escalas, formados esencialmente por procesos de piping. Nótese los depósitos de sales precipitadas por evaporación tras un período de lluvias.

Probablemente el aspecto más controversial reside en la asociación y co-evolución de conductos (pipes) y cárcavas (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.

La formación y evolución de las cárcavas parece responder a varios procesos: retroceso de la cabecera, arroyada, socavamiento basal, profundización, desplome, lavado de las paredes y, sobre todo, piping (Desir & Marín, 2007; Desir et al, 2009). A la vez los gullies constituyen la principal vía de remoción y exportación de materiales fuera de la cuenca. La evolución del relieve está controlada básicamente por la litología y la climatología y, como consecuencia, se trata de un modelado muy dinámico y cambiante debido a los procesos de erosión hídrica y piping (Desir et al, 2009). Estos autores señalan que, dentro de esta dinámica erosiva, el retroceso de las cabeceras se produce principalmente por procesos de piping. 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 donde domina la profundización del canal. Los distintos mecanismos pueden actuar al mismo tiempo o por separado. 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 las cárcavas y 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-Ruiz (2011) los conductos de piping pueden ser tanto una causa como una consecuencia de la evolución de las cárcavas.

En las zonas estudiadas en la Bardena Blanca, 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 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 una cárcava por hundimiento de una red subsuperficial, pero aguas abajo interrumpe su recorrido para continuar fluyendo por vía subsuperficial o a través de mesocavernas. García-Ruiz (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, sin área de cabecera que lo alimente.

Puede concluirse que los procesos de piping en estas arcillas ocurren en ambientes áridos, asociados a una rápida evolución de barrancos y gullies. En tales ambientes el piping sólo es posible si coinciden varios factores: (1) Materiales poco consolidados o rocas blandas (arcillas, limos, lutitas y margas). (2) Presencia de arcillas expansivas, con tendencia al agrietamiento. (3) Alto contenido en sodio, que favorece la dispersión de las arcillas. (4) Fuerte gradiente hidráulico en cortas distancias. El proceso de piping genera así redes de drenaje subterráneo, incentiva la formación de cuevas y gullies, lo que a su vez favorece la aparición de nuevos conductos.

El presente trabajo describe un conjunto de cavidades y geofomas en materiales arcillosos correspondientes a un sector de la Bardena Blanca (cuyos rasgos ilustramos ampliamente mediante fotografías) y agrega datos adicionales para comprender con mayor detalle como actúan los procesos de piping y cómo se produce la formación de cuevas en arcilla.

El alto número de cavidades y geofomas encontrados hacen de las Bardenas una región notable a nivel mundial, tanto por sus rasgos geomorfológicos como en lo que respecta a procesos de karstificación y formación de cuevas en arcilla.

AGRADECIMIENTOS

A todos los miembros y colaboradores del Laboratorio de Bioespeleología de la Sociedad de Ciencias Aranzadi que nos acompañaron en distintas ocasiones en la prospección de varias zonas de Las Bardenas (realizadas algunas veces en épocas del año con condiciones meteorológicas adversas), y en la exploración, topografía y toma de datos de los sistemas de simas y cuevas encontrados. A tres revisores anónimos, de la Sociedad de la Sociedad de Ciencias Aranzadi (SCA) y Sociedad Venezolana de Espeleología (SVE), por sus revisiones críticas, aportes y útiles sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- Castiella, J.; Solé, J. & Del Valle, J. 1978. Mapa y Memoria Geológica de Navarra a escala 1:200.000. Servicio Geológico, Diputación Foral de Navarra.
- Desir, G. & Marín, C. 2007. Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone (Bardenas Reales, NE Spain). *Catena*, 71: 31-40.
- 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. & Coates, D.R., Eds. *Groundwater geomorphology: The role of surface water in earth-surface processes and landforms*. Geological Society of America, Special Publication 252.
- 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. 2015. 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; 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. 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.
- 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.
- Higgins, C.G. & Coates, D.R. Eds. 1990. *Groundwater Geomorphology: The Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms*, Boulder, Colorado: Geological Society of America. Special Publ. 252.
- 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.
- Mears, B. 1968. Piping. In: R.W. Fairbridge (Ed). *Encyclopedia of Geomorphology*. Reinhold, New York.
- Parker, G. et al. 1990. Piping and pseudokarst in drylands. In: Higgins, C.G. & Coates, D.R., Eds. *Groundwater geomorphology: The role of surface water in earth-surface processes and landforms*. Geological Society of America. Special Publ. 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.
- Striebel, T. & Schäferjohann, V. 1997. Karstification of sandstone in central Europe: Attempts to validate chemical solution by analysis of water and precipitates. In: *Proceedings of the 12th International Congress of Speleology*, vol. 1, Basel, Switzerland.