

DINÁMICA DE PIPING Y SISTEMAS COMPLEJOS DE CUEVAS EN ARCILLA: BARDENA BLANCA.

Dynamics of piping and complex cave systems in clay: White Bardena.



Carlos GALÁN.
Sociedad de Ciencias Aranzadi.
Octubre 2017.

DINÁMICA DE PIPING Y SISTEMAS COMPLEJOS DE CUEVAS EN ARCILLA: BARDENA BLANCA.

Dynamics of piping and complex cave systems in clay: White Bardena.

Carlos GALÁN.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Octubre 2017.

RESUMEN

Recientes exploraciones en barrancos de la Bardena Blanca han permitido estudiar nuevos ejemplos de sistemas de cuevas en arcilla, con desarrollos y rasgos de cierta complejidad. Estos plantean algunos interrogantes sobre la diversidad de formas y modos de actuación de los procesos de piping. Y sobre el tipo de cavidades resultantes de tales acciones. A pesar de su homogeneidad aparente, la litología de los materiales arcillosos, disposición topografía y gradiente hidráulico locales, producen comportamientos propios de sistemas complejos y dinámica no-lineal, generando una multiplicidad de cavidades a distintas escalas y ejemplos de naturaleza fractal. Estos aspectos son discutidos en la presente nota.

Palabras clave: Espeleología física, Karst, Cuevas en arcilla, Piping, Hidrogeología, Geomorfología, Sistemas complejos.

ABSTRACT

Recent explorations in canyons of the White Bardena have allowed to study new examples of systems of caves in clay, with developments and features of some complexity. These raise some questions about the diversity of forms and modes of action of piping processes. And on the type of cavities resulting from such actions. Despite their apparent homogeneity, the lithology of clayey materials, topography and local hydraulic gradients, produce behaviors specific to complex systems and non-linear dynamics, generating a multiplicity of cavities at different scales and examples of fractal nature. These issues are discussed in the present note.

Keywords: Physical Speleology, Karst, Caves in clay, Piping, Hydrogeology, Geomorphology, Complex systems.

INTRODUCCION

La exploración de nuevas cavidades en arcilla en la parte Norte de la Bardena Blanca muestra ejemplos análogos a otros descritos previamente (Galán & Nieto, 2015; Galán et al, 2016), pero también casos con rasgos curiosos, más complejos, que plantean nuevos interrogantes.

Como en otros casos de investigación en geomorfología del karst y fenómenos kársticos en litologías inusuales, los primeros pasos consisten en descubrir los procesos fundamentales que actúan para generar los nuevos tipos de cavidades hallados. Cuando esto parece haberse logrado satisfactoriamente, el hallazgo de nuevos ejemplos y el examen en detalle de las evidencias obtenidas permite nuevos avances en las formulaciones teóricas. De modo que se logran mayores precisiones, congruentes con los datos de campo, y cuyo poder explicativo es progresivamente mayor.

En el caso que nos ocupa, sobre karstificación y formación de cavidades en arcilla, el mecanismo genético fundamental es el proceso de tubificación o piping. Pero este no actúa solo. Participa también cierto grado de disolución intergranular de las arcillas, sobre todo en las fases iniciales, y procesos erosivos en el crecimiento volumétrico posterior. En una dinámica no-lineal, propia de sistemas complejos, que interactúa con el modelado de superficie, en un contexto general influido por la climatología de la región y su evolución geomorfológica anterior.

En el caso de la Bardena Blanca, las cuevas se desarrollan en materiales arcillosos, de consistencia variable, relacionadas con una red de cañones y barrancos (excavados en una planicie) los cuales forman una red hídrica de carácter temporal. La erosión es muy activa (en caso de fuertes lluvias) y determina la progresiva excavación de barrancos, su entallamiento vertical y la erosión remontante hacia sus cabeceras. Las tasas de erosión son elevadas y alcanzan 32 Tm/Ha/año (toneladas métricas por hectárea al año) para materiales Terciarios y 77,2 Tm/Ha/año para materiales Holocenos, exportando anualmente hasta 12 Hm³ de sedimentos al río Ebro (Desir & Marín, 2007).

La erosión es así 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 en los que participa activamente el piping. La tubificación o piping consiste en la formación de conductos tubulares (= pipes) por remoción de partículas de la roca por flujos de aguas subterráneas 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 (Halliday, 2004). Entre ambos extremos hay toda una gama de situaciones intermedias, donde disolución y piping pueden actuar juntas, en variables proporciones, existiendo un continuo entre cuevas de tubificación y cuevas de disolución, en rocas de distintas solubilidades.

Los materiales arcillosos de las Bardenas poseen altos valores de sodio intercambiable y cambian sus propiedades físicas según su estado de hidratación. Al haber un predominio de arcillas expansivas, se favorece el agrietamiento y se canaliza la escorrentía hacia el interior del sedimento. La disolución del sodio acelera la pérdida de coherencia y desflocula las arcillas, produciendo piping. Los flujos de infiltración se canalizan y generan conductos tubulares (pipes) en los cuales se produce remoción intergranular. Las aguas infiltradas verticalmente, al encontrarse con niveles progresivamente menos permeables en profundidad, tienden a circular horizontalmente formando redes de galerías, con líneas de flujo determinadas por el gradiente hidráulico. Si los procesos persisten llegan a formarse simas y cuevas a escala humana (macroavernas).

Tanto la capacidad de hinchamiento de las arcillas 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 las arcillas Miocenas de la Formación Tudela (de las cuales derivan), un índice de dispersión medio y altos valores de SAR (Sodium Adsorption Ratio) y sodio intercambiable (ESP: Exchangeable Sodium Percentage). 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 (Marín & Desir, 2010; García-Ruiz, 2011). Cuando el sodio representa un alto porcentaje del total de cationes puede producirse piping y colapsos. El piping en estos casos coincide con materiales poco coherentes: 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, siguiendo unas líneas preferentes de flujo (Gutiérrez et al, 1997).

El proceso de piping en arcilla comúnmente 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). 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.

Cada ciclo de lluvias permite la actuación del piping, pero también erosiona y amplía los conductos, genera colapsos, y remueve los materiales desprendidos. Introduciendo distintos niveles de base locales que generan mayor complejidad y diversidad de formas en las galerías subterráneas. En una evolución dinámica con múltiples rasgos de naturaleza fractal, producida por una clase de proceso de retroalimentación no-lineal conocido como iteración, en el que una función opera reiteradamente sobre sí misma. Estos aspectos serán tratados a lo largo de la presente nota.

MATERIAL Y METODOS

En la exploración de cavidades se utilizaron frontales con iluminación de Leds y técnica vertical de cuerda estática y jumars. En las topografías se utilizó instrumental de precisión Suunto (brújula y clinómetro). Fueron tomadas fotografías a color con una cámara digital Canon a fin de ilustrar las principales características de las cavidades y su entorno.

RESULTADOS

Los sectores prospectados se localizan en la parte Norte central de la Bardena Blanca (Navarra) y comprenden el Barranco de las Cuevas, partes del Barranco Grande y Barranco de las Bodegas, y parte de una red de pequeños cañones afluentes de los barrancos principales. Se trata de un territorio extenso, donde los cañones prospectados cubren varios kilómetros (Figuras 01 á 04).

A lo largo de los recorridos encontramos numerosas cuevas-simas que perforan las paredes de los barrancos, varias cuevas que forman túneles en los cauces de afluentes menores, dos sistemas de cavidades de mayor complejidad en zonas de unión de cañones y diversas geoformas. Sus rasgos a menudo repiten los mismos patrones, a distintas escalas, y poseen atributos curiosos, que suscitan diversos interrogantes.



Figura 01. Aspecto general del área de estudio en la parte Norte de la Bardena Blanca. La red de barrancos surca la desértica planicie central.



Figura 02. Zona de cabecera de la red de barrancos, con arcillas de distintos colores, niveles con guijarros y clastos angulosos, e intercalaciones de estratos delgados de calizas y margas, que colapsan en bloques.



Figura 03. Barrancos y cañones entallados, con algunos ejemplos de torres residuales y aberturas de conductos de piping de distintos diámetros.



Figura 04. Detalle de las paredes arcillosas de los barrancos, con numerosas cavidades y surcos de piping.



Figura 05. Formación de torrecillas bajo fragmentos de estratos duros y torres residuales. Se aprecia también agrietamientos poligonales por retracción de los materiales arcillosos al perder agua intergranular.



Figura 06. Sobre las paredes de los barrancos se abren pequeñas cuevas, con salas internas en comunicación con pipes inferiores (arriba), y cuevas de mayor diámetro con claraboyas amplias abiertas al plano superior (debajo).



Figura 07. Pequeñas cuevas-túneles en gullies afluentes del Barranco de las Cuevas.



Figura 08. Cueva en la parte inferior de un gully. El cauce se ha encajado progresivamente y el techo ha colapsado, dejando sólo un puente de roca superior, testigo de un antiguo nivel de excavación. Se aprecian pipes verticales, surcos de piping, y suelos con arcillas agrietadas.



Figura 09. Detalles del puente de roca superior, con una ventana-claraboya lateral. En las paredes del gully se aprecian otras pequeñas cavidades y pipes verticales que taladran las zonas de borde.

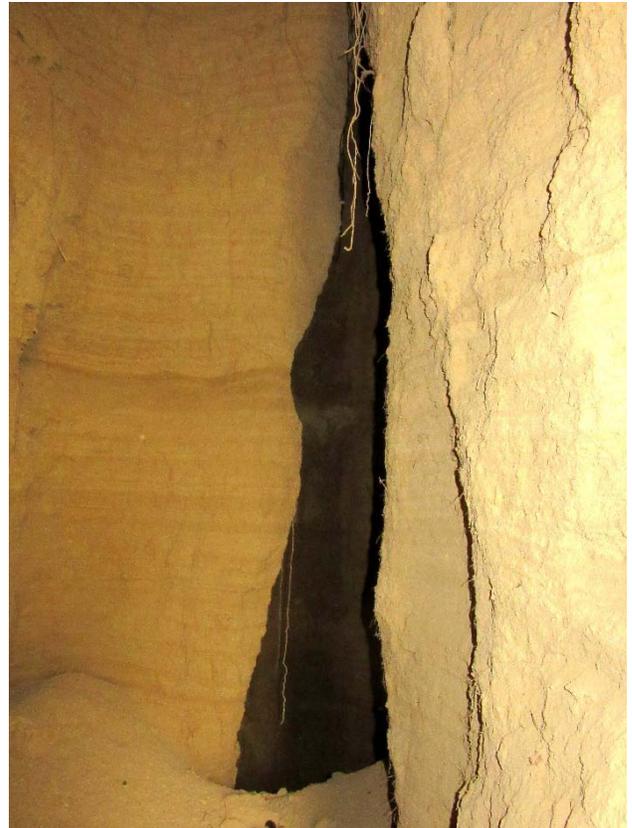


Figura 10. En las paredes de los barrancos mayores, de 12-15 m de altura, se abren distintos tipos de cavidades, de escaso desarrollo. Arriba: Cueva simple, con suelos de materiales finos, secos y polvorientos. Debajo: cavidad de perfil longitudinal en L, donde los materiales desprendidos forman un cono de deyección sobre el barranco, el cual será probablemente removido por las siguientes crecidas hidrológicas.



Figura 11. Distintos tipos de cuevas en L y oblicuas perforan los bordes de las paredes de los barrancos. Aunque el desarrollo de cada cueva individual es moderado, su número es muy elevado, existiendo varios miles de ellas en la Bardena Blanca.



Figura 12. Cueva colgada en la pared de un barranco y eflorescencias salinas blancas formadas por el ascenso, evaporación y precipitación de aguas porales e intergranulares.



Figura 13. Tramo en la cabecera de un barranco con el cauce sobre estratos delgados de caliza, intercalados en la serie de arcillas ocre y rojas de edad Mioceno. Las calizas presentan en superficie pequeñas geoformas de disolución, pero dada su escasa potencia no participan en los procesos de karstificación.



Figura 14. Los estratos delgados de calizas y margas en los cauces, se fracturan y colapsan en bloques al progresar la erosión en el fondo del barranco. Esto también ocurre en el interior de las cuevas.



Figura 15. El modelado general de los barrancos sigue las diferencias de litología. Las lajas de caliza en el cauce, algo más resistentes, forman pequeños saltos que excavan pozas, rellenas de agua tras lluvias recientes. Las paredes arcillosas muestran por su parte numerosos surcos y conductos de piping.

Las Bardenas es una amplia región (de 600 km²) situada en el SE de Navarra, que formó parte de una cuenca endorreica durante el Terciario (la depresión o lago del Ebro). La cuenca endorreica comenzó a formarse durante el Eoceno y pasó a ser exorreica en el Mioceno final. Durante este lapso se rellenó de sedimentos fluvio-lacustres (fundamentalmente arcillosos) procedentes de la elevación de la cadena Pirenaica, al Norte, pero también recibió algunos aportes de la cadena Ibérica, situada al Sur. A partir del Plioceno la cuenca comienza a erosionarse y vaciarse originando relieves tabulares 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, con relieves extraños de mogotes y cerros de erosión de topes tabulares.

El clima de 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 épocas invernales. 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, aunque sigue existiendo 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 la Bardena Blanca predominan ampliamente dos litologías: (1) Las arcillas y lutitas terciarias de la Formación Tudela (de edad Mioceno inferior a medio), con una potencia aproximada de 300 m, que forman los cerros y mesetas, y que poseen intercalaciones espaciadas de estratos delgados de calizas, margas y areniscas, con algunos niveles de yeso en su parte inferior. Estos materiales están revestidos localmente por glaciares de cobertera del Pleistoceno (cantos y gravas con abundante matriz limo-arcillosa). (2) Las arcillas y limos poco litificados y menos compactos de edad Holoceno, que ocupan el fondo de los barrancos mayores, algunas planicies y la depresión central de la cuenca. 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 y cañones 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 (Desir & Marín, 2007). Localmente, en torno a los barrancos, pueden desarrollarse redes de cañones menores o gullies, de escasa anchura pero profundamente entallados, formados precisamente por procesos de piping.

La litología de los materiales arcillosos Terciarios y Holocenos es semejante. Las arcillas de la Formación Tudela 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 y ESP, y coeficientes de hinchamiento que pueden llegar hasta el 12%. Estos materiales presentan un alto contenido en arcilla. Los minerales de la arcilla identificados han sido illita (82-86%), clorita (9-16%) y trazas de caolinita. Es importante destacar que, desde un punto de vista hidrogeológico, la permeabilidad de todos estos materiales es muy baja, debido al marcado predominio de los términos arcillosos.

Las exploraciones efectuadas en años recientes en las Bardenas han dado lugar al hallazgo de numerosos sistemas de simas y cuevas en arcilla, los mayores de ellos (de hasta 880 m) se han formado en materiales arcillosos de la Formación Tudela en taludes de mesetas de la Bardena Negra (Galán, 2015). 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.

El sector explorado en la Bardena Blanca durante este trabajo posee una red entallada de drenaje temporal, donde amplios barrancos tienen una red secundaria de gargantas y pequeños cañones (Figura 03 y 04). 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 (Figuras 05 a 19), así como zonas caóticas de badlands con hundimientos y colapsos.

La lluvia aquí es rara y escasa, pero suficiente para generar numerosas cuevas de tubificación en gargantas estrechas o gullies y perforando las paredes de los barrancos mayores. Los cañones menores forman ranuras profundas y estrechas, serpenteantes, con paredes verticales, que recorre el agua durante las lluvias. Muchos de ellos se interrumpen en sus cabeceras, cortadas por paredes con pipes verticales. En otros casos, deslizamientos y bloques de colapso se acunían entre las paredes y forman los techos de cuevas que pueden alcanzar varias decenas de metros de largo. No son tampoco infrecuentes las cuevas pequeñas, a varios niveles, con múltiples entradas y colapsos, en conexión con pipes menores. En condiciones atmosféricas normales, las galerías de las cuevas constituyen ambientes secos y polvorientos, donde con frecuencia afloran raíces en sus paredes y techos.

Los cauces de los barrancos en general tienen rellenos de gravas, arenas y limos, de edad Holoceno, y están limitados por secuencias espesas de arcillas y lutitas ocreas, rojas y grises de edad Aragoniense (Mioceno). Las series arcillosas incluyen estratos delgados y espaciados de calizas y margas, que a veces sobresalen o quedan en relieve positivo en las paredes y cauces. Generalmente estos estratos colapsan en lajas y bloques, siendo atravesados por los conductos subterráneos sin participar en la karstificación. Algunas lajas aflorantes de caliza muestran huellas superficiales de disolución y formación de alveolos, tal vez con intervención de procesos de haloclastia, dada la presencia de sales (Figuras 11 a 15).

El alto contenido en sales también es puesto de manifiesto por depósitos salinos, costras y caprocks (superficies endurecidas) formadas por evaporación de aguas porales tras períodos de humectación de las arcillas (Figura 12).

En la zona de cabecera de los barrancos, y también en el borde de las paredes, son frecuentes relieves residuales en forma de torrecillas y chimeneas de las hadas, a todas las escalas imaginables (Figura 05). Estas se forman por rebajamiento erosivo del terreno adyacente, estando las torres protegidas y coronadas por estratos duros o fragmentos de los mismos, aunque pueden perderlos y formar agujas o monolitos irregulares.

En los gullies menores son frecuentes cortas cuevas-túneles sobre el cauce (Figuras 07 á 09). También pueden formarse en las paredes cuevas colgadas, con salas internas más amplias que sus bocas, y con drenaje subterráneo a través de mesocavernas y pipes menores. Pero lo más frecuente son simas-cuevas del orden de 10-20 m de largo que perforan la zona de borde de las paredes de los barrancos mayores. Estas pueden tener un perfil inclinado o en forma de "L", pueden tener salas y depresiones internas, y pueden alcanzar su mayor amplitud en la base o en la parte alta, formando amplias claraboyas. A menudo están conectadas con pipes menores o contienen cauces entallados en su base que sirven para evacuar los materiales desprendidos. El crecimiento volumétrico de las galerías conduce a la formación de arcos y puentes de roca (Figuras 08 á 11), o al colapso completo de sus techos, con la destrucción de las cavidades previas. Existiendo una amplia diversidad de cavidades y geoformas, a distintas escalas (Figuras 06 á 18).

Los casos de cavidades con desarrollos espaciales más complejos los presentan dos cavidades o sistemas localizados en la zona de confluencia de gullies laterales con las paredes de barrancos mayores, y serán descritos e ilustrados a continuación.

Sistema 1.

Situación: En la margen izquierda del Barranco Grande, a 160 m al SSW de la confluencia con el Barranco de las Bodegas.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.769.542; E 626.103; Altitud 305 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Desnivel: +12 m; Desarrollo espacial: 78 m. Figura 20. Plano en Figura 21.

Descripción: Se trata de una cueva-túnel que enlaza con un gully superior. El gully totaliza 40 m de largo y enlaza a través de la cueva-túnel, amplia y de 20 m de largo, con la base de la pared del Barranco Grande. El tramo de túnel presenta repisas a varios niveles y una galería colgada a +7 m que enlaza con otra repisa de la pared. Esta galería lateral contornea un amplio pilar de roca y tiene tres laterales menores que se extienden hacia el N, con salitas y uno de ellos con una claraboya que enlaza con el plano superior. En el extremo de la galería colgada hay otro entrante con dos cortos niveles superpuestos y otra claraboya.

Sobre las cornisas del lado externo existen dos pequeñas torres y en el escarpe del lado E un pequeño sistema de conductos pequeños con bocas abiertas hacia la superficie de la pared. El túnel posee en su parte interna un pequeño laminador surgente bajo un escarpe del gully superior.

En el gully hay también cornisas al mismo nivel que la galería colgada. Lo que sugiere que el gully fue antes una cueva que drenaba hacia el barranco a través de la galería colgada. Puede suponerse que la cavidad evolucionó profundizando el cauce hasta el nivel de la cueva-túnel, perdiendo su techo en lo que hoy es el gully, y drenando a su vez hacia el laminador inferior. Los pequeños laterales y claraboyas de la galería colgada corresponderían a capturas de pipes adyacentes, con desagüe hacia la primitiva cavidad. Igualmente se han formado nuevos pipes verticales sobre el talud subvertical del entrante Este. El orden en que han ocurrido los distintos eventos es difícil de precisar, pero puede entenderse que los procesos de piping y formación de conductos se suceden en el tiempo y siguen activos en el presente.

La morfología de la cavidad induce a pensar que cada volumen o vacío subterráneo excavado, a lo largo de esta evolución, ha actuado como nivel de base local para la captura de la infiltración vertical en terrenos contiguos, ampliando progresivamente la red de galerías. De igual modo la presencia de torres residuales en el borde externo sugiere que parte de la red se ha perdido al progresar el retroceso de la pared del barranco principal.

Si consideramos al gully como una sima o depresión cerrada, el desarrollo espacial del conjunto supera los 120 m.

Sistema 2.

Situación: En la margen derecha del Barranco Grande, a 230 m al WSW del sistema 1.

Coordenadas ETRS89, UTM 30N: N 4.769.441; E 625.893; Altitud 302 m snm. Mapa de Referencia: Cartografía SITNA.

Dimensiones: Desnivel: +16 m; Desarrollo espacial: 82 m. Figuras 22 á 28. Plano en Figura 29.

Descripción: Se trata de una cavidad de trazado complejo, con varias partes, situada en la confluencia de un gully de 120 m de largo con el Barranco Grande. La cavidad principal posee una boca amplia y ascendente, que forma un codo en la cota +8 m para seguir ascendiendo hasta una boca superior (cota +16 m). Posee otra galería colgada, que se abre frente al codo, y comunica con una repisa en la parte alta de la boca inferior. Desde ésta parte otro conducto que vuelve a enlazar con la repisa y una tercera galería, más larga y descendente, que comunica con una amplia sima-claraboya, adyacente a la boca principal. Esta sima está obstruida en su base por colapso, mientras que su parte alta ha perdido la pared externa y se presenta como una sima recortada por el retroceso o colapso de dicha pared.

Diversos detalles sugieren que la cueva formó primero una galería de drenaje que enlazaba la boca superior con la galería colgada y la sima. Y que luego evolucionó formando los conductos de la repisa, y por último la rampa abierta a la boca inferior.



Figura 16. Galería horizontal de una cueva de 20 m, con morfología caótica y formas fractales. La galería tiene 5 m de ancho. Se aprecian hondonadas en el suelo, claraboyas y figuras de fluidificación en las arcillas de las paredes.



Figura 17. Diversos aspectos del interior de la cavidad de la Figura 16. Nótese los hundimientos en forma de embudo que conducen el drenaje temporal bajo el suelo de la galería y vista desde el interior hacia la boca.



Figura 18. Barrancos con flujos temporales de agua y cárcavas formadas a partir de antiguas cuevas (arriba). Los colapsos también contribuyen al desarrollo de morfologías caóticas, en cuevas y en superficie (debajo).



Figura 19. Fractales naturales, con rasgos repetidos a distintas escalas. La imagen superior muestra un relieve tabular, de 2,5 m de alto, que reproduce en pequeño los rasgos de las mesetas mayores. Imagen inferior: cauce de 1 m de ancho con puente de roca o cueva-túnel y geoformas en miniatura de simas y cuevas de pipping.



Figura 20. Sistema 1. Galería-túnel principal (que enlaza con el gully), cornisas y laterales colgados (arriba). Detalle de galería lateral (centro). Y vista de conjunto de la pared con la boca y el entrante anexo (debajo).

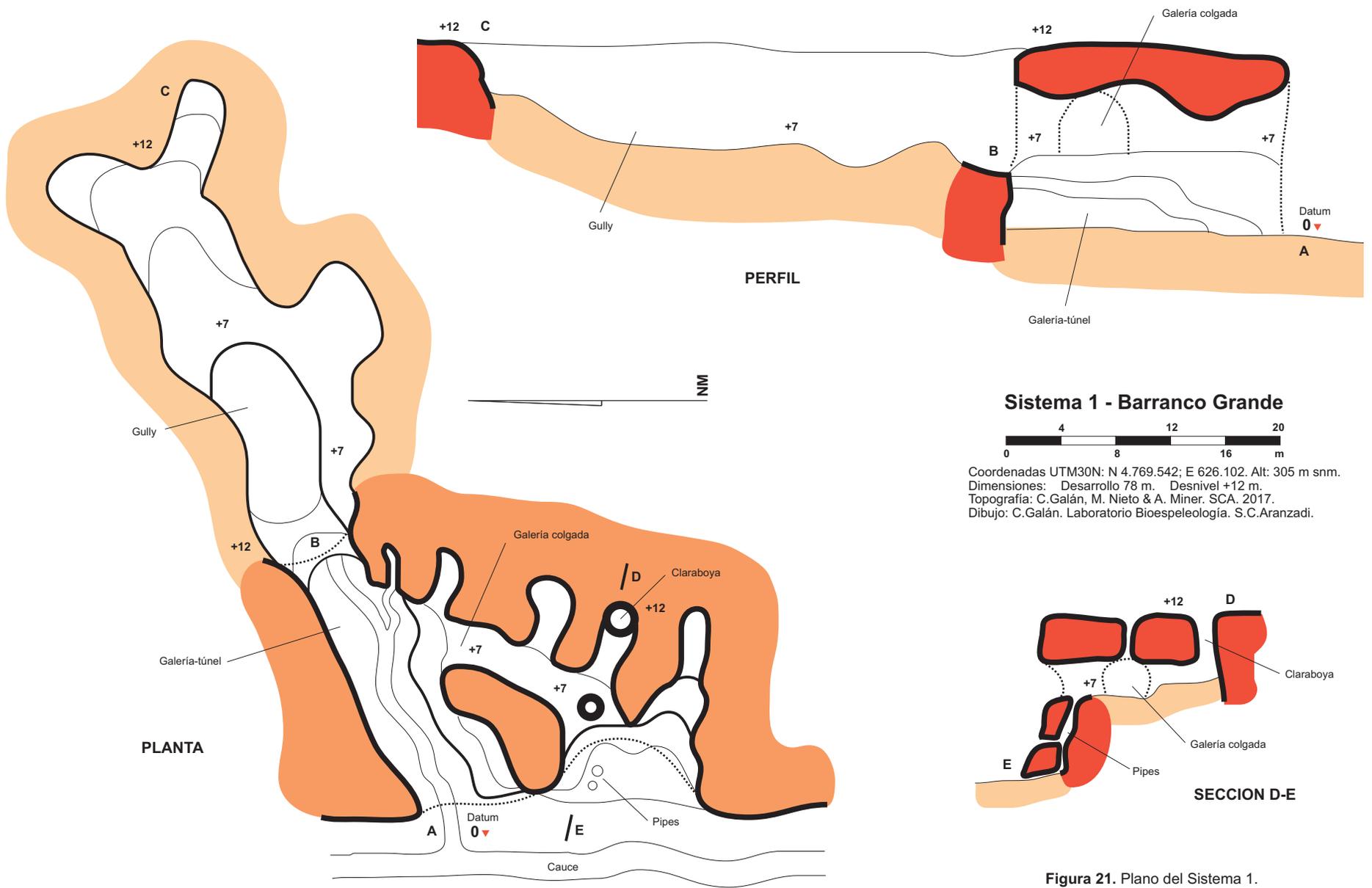




Figura 02. Sistema 2. Vista general de la boca de acceso y detalle de lutitas ocre, rojas y grises. La pared tiene 16 m de alto.



Figura 23. Vista de la boca principal, con cornisa y sima colapsada (a la izquierda, flecha roja) sobre la pared del fondo, en la confluencia del gully con el Barranco Grande, donde quedan torres residuales (imagen superior).
Vista desde el codo de la galería principal hacia el exterior (imagen inferior). Sistema 2.

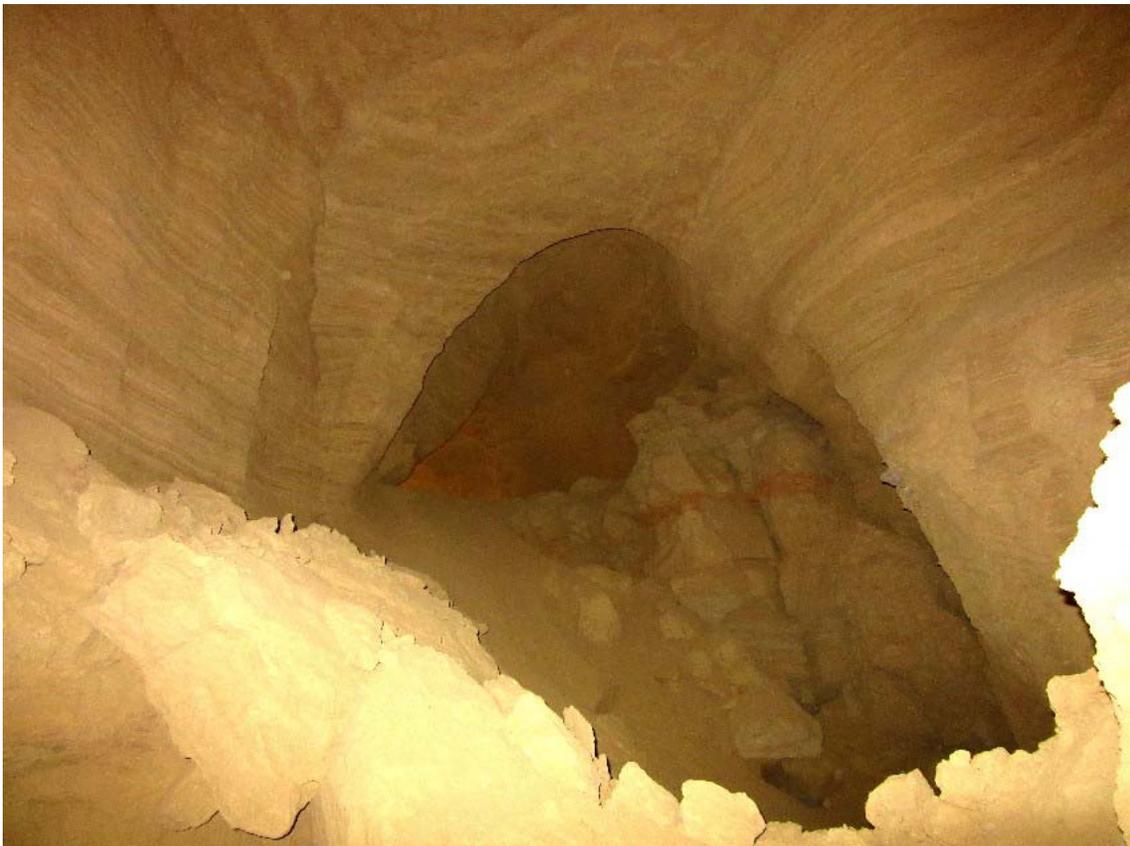


Figura 24. Detalles de la galería principal del Sistema 2. Vistas desde el codo hacia la boca superior. Nótese las paredes compactas y el suelo con bloques disgregados, rellenos pulverulentos y hundimientos embudiformes.



Figura 25. Sistema 2. Vista desde el codo hacia la boca de acceso (se aprecia el inicio de la galería colgada) y vista desde el mismo punto hacia la luz que penetra por la boca superior, al fondo (imágenes con flash).



Figura 26. Sistema 2. Detalle de cornisa con laterales colgados sobre la entrada de la boca principal (arriba) y sector inicial de la cueva en S situada en el lado opuesto del gully, con claraboya secundaria (debajo).



Figura 27. Desarrollo tortuoso de la cueva en S (Sistema 2), con cauce entallado y hundimientos entre sedimentos arcillosos secos y pulverulentos. Se aprecian algunas raicillas que emergen de las paredes compactas.



Figura 28. Continuación sinuosa de la galería hacia la boca superior (se aprecia su luz al fondo) y detalle de los meandros encajados en el cauce (cueva en S, Sistema 2).

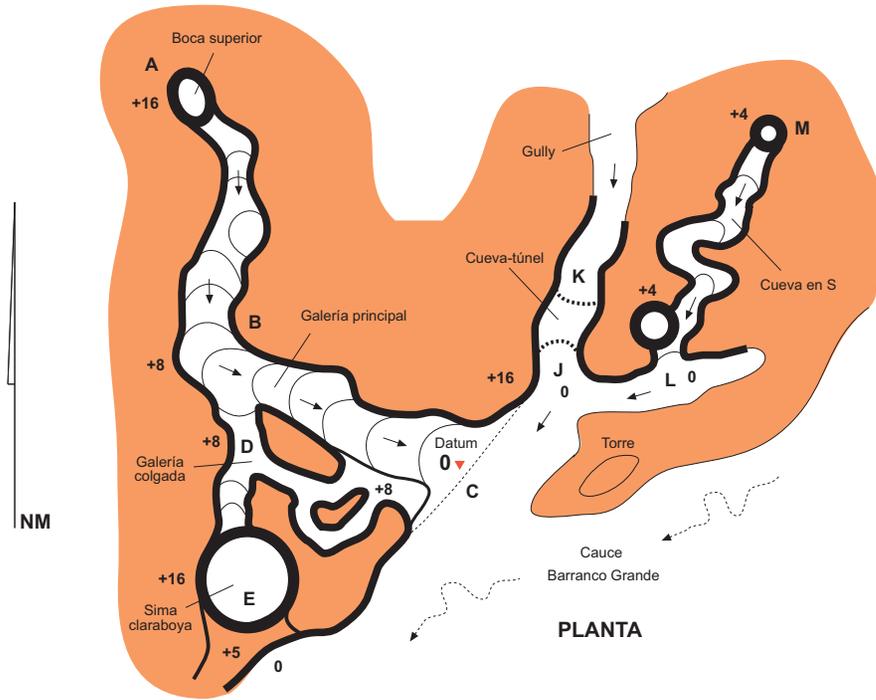
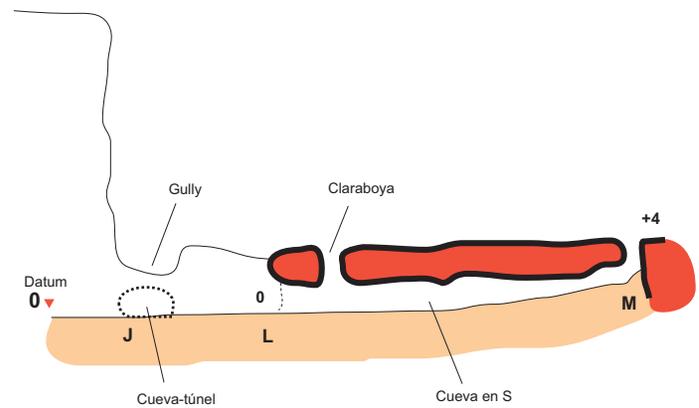
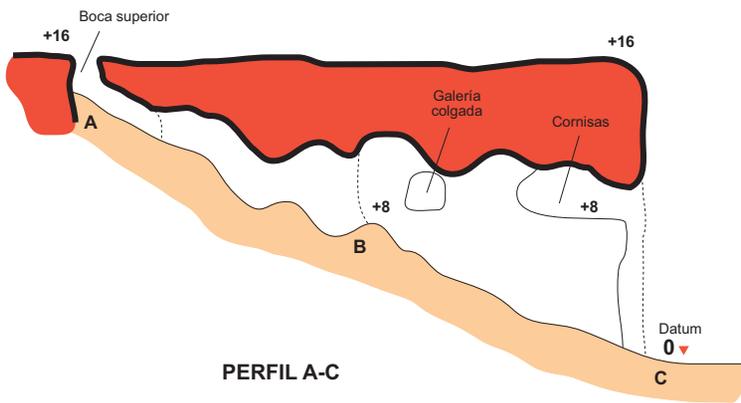
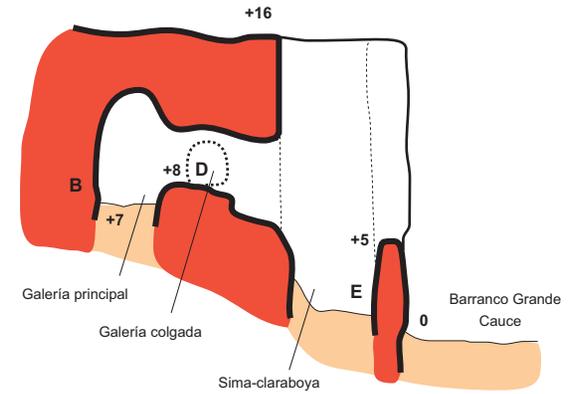


Figura 29. Plano del Sistema 2.

Sistema 2 - Barranco Grande



Coordenadas UTM30N: N 4.769.441; E 625.893. Alt: 302 m snm.
 Dimensiones: Desarrollo 82 m. Desnivel +16 m.
 Topografía: C.Galán, M. Nieto & A. Miner. SCA. 2017.
 Dibujo: C.Galán. Laboratorio Bioespeleología. S.C.Aranzadi.



PERFIL L-M

Al lado de la boca de acceso, y parcialmente techado por la terminación del gully, se abre enfrente otro cañoncito que deja aislada una torre residual en la confluencia con el Barranco Grande (Figura 23). Remontando el fondo del gully, a los pocos metros se bifurca. Una rama posee un arco de roca o cueva-túnel por donde sigue remontando el cañón. La otra rama describe un giro y presenta una cueva ascendente, con un cauce entallado (Figuras 26 á 28). El conducto, de 1,5 á 2 m de diámetro, tiene primero un trazado en "S" muy marcado y prosigue luego en forma sinuosa para salir a una boca-claraboya superior, abierta en una zona deprimida caótica que corresponde a una zona de colapso y ampliación lateral del gully.

Tanto la primera cueva como la cueva en S tienen suelos con sedimentos muy finos, pulverulentos, donde el explorador hunde sus botas 20 cm (hasta los tobillos) al avanzar. Y estos rellenos recubren bloques terrosos con hundimientos en forma de embudo por donde debe escapar el drenaje temporal hacia meandros y pipes inferiores, subhorizontales. Este tipo de material fino, seco y polvoriento, se encuentra también en otras cavidades que perforan las paredes de los barrancos. Diversos indicios sugieren que se forma por disolución y desagregación intergranular de las paredes arcillosas por aguas porales. La cueva-túnel, en cambio, tiene un cauce de guijarros y gravas, como el fondo del gully y otras galerías con drenajes temporales activos en la actualidad.

La primera cueva alcanza 64 m de desarrollo espacial, la cueva en S 16 m, y el arco o cueva-túnel 2 m, totalizando para el conjunto 82 m de desarrollo de galerías.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El área de estudio presenta una red de barrancos con infinidad de pequeñas cavidades y algunos sistemas algo más complejos, con redes de galerías y conductos de hasta varias decenas de metros. Igualmente sobre las paredes (y en algunos rellenos de colapso) se observa un sinfín de pequeños conductos, pipes y surcos menores, que permiten apreciar como actúan los procesos de piping y erosivos a distintas escalas y en distintas situaciones.

Tanto la ampliación volumétrica de las galerías como los colapsos, acompañan al modelado de la región, ampliando la red de barrancos en las planicies y formando nuevas redes de cañones y gargantas menores, que van disectando y erosionando el terreno en una incesante y activa dinámica, asociada al régimen de lluvias y drenajes temporales. Los procesos de piping ocurren reiteradamente y generan cavidades y geoformas a distintas escalas, con muchos rasgos de naturaleza fractal.

La remoción de los materiales desprendidos y su exportación hacia el Ebro ocurre a través de los cauces de los barrancos principales, siguiendo el proceso general de rebajamiento y vaciado de los materiales Terciarios de la cuenca de las Bardenas.

En esta evolución los procesos de piping contribuyen de modo continuado a la erosión general del terreno. Labrando nuevos conductos, que llegan a formar cuevas en arcilla, de cierta persistencia en el tiempo, pero que son también destruidas al progresar la erosión, desmantelando las redes antiguas. El piping parece requerir la existencia de cierto gradiente hidráulico, lo que es logrado con facilidad en las zonas de borde de las paredes de gullies y barrancos, donde existe un desnivel o salto importante que permite su actuación.

La complejidad observada en el trazado de las galerías de los sistemas de cuevas, indica que la excavación de galerías, a distintos niveles, actúa creando nuevos niveles de base locales, que permiten ampliar lateral y verticalmente la formación de conductos de piping. La abertura de claraboyas, colapso de techos, vuelcos y deslizamientos, tienden a producir obstrucciones y a generar desarrollos tortuosos, encajándose el drenaje subterráneo en niveles progresivamente más profundos, pero siempre limitados por el punto de salida de las aguas infiltradas en el fondo plano de los barrancos mayores.

Conviene ahora señalar que la mayor parte de la naturaleza es muy complicada. ¿Cómo describir una nube, un relámpago? Son muy irregulares. Y para describirlos el lenguaje geométrico usual es inadecuado. Mandelbrot (1983) se dio cuenta de que una gran variedad de fenómenos naturales irregulares compartían algunas características geométricas comunes muy sorprendentes. Para describir y analizar estas características desarrolló la geometría fractal. La propiedad fundamental de las formas fractales reside en que sus patrones se encuentran repetidamente en escalas descendentes, de modo que sus partes, a cualquier escala, son semejantes en forma al conjunto. Hay muchos ejemplos de esta autosemejanza en la naturaleza, por ejemplo, en rocas en montañas que se asemejan a pequeñas montañas, ramas de relámpagos, líneas de costa o bordes de nubes que, divididas en partes cada vez menores repiten el mismo patrón. Esto también se da en muchos rasgos geomorfológicos de las Bardenas.

Esta autosemejanza de formas puede alcanzar varios órdenes de magnitud en los fractales naturales, de modo que tal forma, reducida cientos a miles de veces (Figuras 05 y 19), muestra aproximadamente el mismo patrón.

En el mundo de los modelos y ecuaciones lineales, se creía que los sistemas descritos por ecuaciones simples se comportaban simplemente, mientras que los descritos por complicadas ecuaciones lo hacían de modo complejo. En el mundo no-lineal -que hoy sabemos incluye la mayor parte del mundo real- los procesos simples pueden producir una gran variedad de comportamientos. En los fenómenos no-lineales frecuentemente ocurren procesos de retroalimentación. Mientras en los sistemas lineales los pequeños cambios producen pequeños efectos, en los sistemas no-lineales los pequeños cambios pueden tener efectos mayores, ya que son repetidamente amplificadas por retroalimentación positiva (Galán, 2010).

Matemáticamente un loop de retroalimentación corresponde a una clase de proceso no-lineal conocido como iteración, en el que una función opera reiteradamente sobre sí misma. Las formas que definen exhiben autosemejanza. El proceso de iteración, la

repetición de cierta operación geométrica una y otra vez, se revela así como la característica matemática central en el vínculo entre la teoría del caos y la geometría fractal. No obstante, no todos los rasgos referidos son de naturaleza fractal, ya que en la evolución del modelado de las Bardenas interactúan muy diversos factores a lo largo del tiempo, especialmente las variaciones hidrológicas.

La operación reiterada del mecanismo de piping genera los rasgos fractales que presentan a distintas escalas muy diversas cavidades y geoformas en las zonas exploradas. Un pequeño cambio en las condiciones de flujo iniciales, el paso de un régimen laminar a otro turbulento en los conductos, la creación continua de nuevos pipes, la ampliación de vacíos con captura progresiva del drenaje adyacente en conductos menores, los colapsos que generan obstrucciones y obligan a las aguas a buscar nuevos caminos, o simples diferencias laterales y verticales en la litología de los materiales arcillosos, introducen cambios, impredecibles, que hacen derivar al sistema hacia unas nuevas condiciones hidrodinámicas. El conjunto de vacíos y la diversidad de escalas en la que opera la disolución intergranular, la remoción de partículas en pipes y conductos menores, y el drenaje jerarquizado a nivel de galerías y macroconductos, tiene por consecuencia una operación reiterada de los mismos procesos, generando de este modo cuevas de trazado complejo y formas fractales.

Otro aspecto adicional deriva del cambio en las propiedades físicas de las arcillas según su estado de hidratación. Las arcillas hidratadas resultan altamente cohesivas a la vez que impermeables, y contribuyen a mantener el equilibrio mecánico en las galerías formadas, evitando su desmoronamiento y permitiendo una mayor permanencia en el tiempo. De hecho, así como se observa ejemplos de cavidades inestables, con colapsos recientes, se da también el caso inverso, de galerías con perfiles muy estables, tanto inactivas como hidrológicamente activas, donde es frecuente el desarrollo de cauces secundarios tallados sobre los depósitos de sedimentos que ocupan el suelo de galerías amplias.

Muchos rasgos exhibidos por las cavidades de las Bardenas difieren ampliamente de aquellos propios del karst clásico en caliza, mostrando que los procesos de karstificación en materiales arcillosos y rocas poco solubles crean paisajes con rasgos específicos. Muchos de sus rasgos individuales pueden ser de corta duración; algunos duran sólo de una tormenta a la siguiente. El paisaje general, sin embargo, tiende a persistir a través de largos periodos de tiempo.

Podemos concluir que una gran diversidad de factores actúan o han podido actuar a lo largo del tiempo para generar las morfologías hoy observadas, que se mantienen en equilibrio dinámico. Las formas son en consecuencia el resultado de múltiples interacciones y procesos iterativos, no-lineales, comandados por la acción del mecanismo de piping en los materiales arcillosos.

AGRADECIMIENTOS

A Marian Nieto y Ainhoa Miner por su inestimable colaboración en las exploraciones y trabajos de campo. A dos árbitros de la Sociedad de Ciencias Aranzadi y Sociedad Venezolana de Espeleología, por la revisión del manuscrito y sus útiles sugerencias.

BIBLIOGRAFÍA

- Desir, G. & Marín, C. 2007. Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone (Bardenas Reales, NE Spain). *Catena*, 71: 31-40.
- 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.
- Galán, C. 2010. Patrones y estructuras disipativas en cuevas y geoformas del pseudokarst de Jaizkibel. Pag web Cota0.com + Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 28 pp
- 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.; J.M. Rivas; M. Nieto & J. Fortsner. 2016. 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.
- 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.
- Mandelbrot, B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. Ed. Freeman, New York.
- 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.
- 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.