Notas sobre cuevas y grutas en arenisca del flysch Eoceno. Pseudokarst en arenisca, Gipuzkoa (País Vasco).

Notes on grottoes and caves in sandstone in the Eocene flysch. Pseudokarst in sandstone, Gipuzkoa (Basque Country).

Carlos GALAN; José RIVAS & Marian NIETO.
Sociedad de Ciencias Aranzadi. E-20014 San Sebastián - Spain.
E-mail: cegalham@yahoo.es
(Agosto 2008)

Notas sobre cuevas y grutas en arenisca del flysch Eoceno. Pseudokarst en arenisca, Gipuzkoa (País Vasco).

Notes on grottoes and caves in sandstone in the Eocene flysch. Pseudokarst in sandstone, Gipuzkoa (Basque Country).

Carlos GALAN; José RIVAS & Marian NIETO.
Sociedad de Ciencias Aranzadi. Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.
E-mail: cegalham@yahoo.es
(Agosto 2008)

RESUMEN

Se describen varios tipos de cuevas y grutas formadas en arenisca de cemento carbonático, localizadas en el flysch Eoceno de Gipuzkoa. Las cavidades forman parte de un pseudokarst y han sido formadas por procesos de disolución intergranular de la arenisca. Una combinación de factores geomorfológicos, hidrológicos, geoquímicos y climáticos, interviene en su génesis y condiciona el tipo de cavidad que será formado. Se discuten las características, modo de formación y probable evolución de las cavidades, así como su relación con otras geoformas en esta litología.
Palabras clave: Espeleología, pseudokarst, arenisca, geomorfología, hidrogeología, cuevas, abrigos, geoformas.

ABSTRACT

Different kinds of grottoes and caves in quartzitic sandstone of carbonatic cement, located in the Eocene flysch of Gipuzkoa are described. These cavities are placed in a pseudokarst and have been formed by intergranular dissolution processes. A combination of geomorphologic, hydrologic, geochemical and climatic factors takes part in their origin and condition the type of cave that will be formed. The characteristics, way of formation and possible evolution are discussed, as well as their relationship with other geoforms in this lithology.
Key words: Speleology, pseudokarst, sandstone, geomorphology, hydrogeology, caves, shelters, geoforms.

INTRODUCCION

El objeto de esta nota es describir ordenadamente diversos hallazgos de cuevas, grutas y formas pseudokársticas en arenisca del flysch Eoceno. Lo que implica de algún modo clasificar y tipificar las cavidades exploradas, las cuales, aunque de pequeño o moderado desarrollo, son numerosas y morfológicamente diversas.

Probablemente esta nota resulta insuficiente para aclarar todos los aspectos involucrados en la formación de cavidades en arenisca del flysch Eoceno y su lectura puede contrariar a quien espere encontrar fáciles enseñanzas y esquemas sencillos. La diversidad de los fenómenos naturales es elevada y leves diferencias en unos pocos parámetros pueden generar grandes variaciones en sus formas. Las mismas dificultades que seguramente habrán encontrado los meteorólogos para clasificar las nubes u otros fenómenos atmosféricos, se nos presentan a nosotros en un medio sólido para comprender y explicar la no menos curiosa diversidad de vacíos y geoformas modelados por la acción del agua sobre la roca. No obstante, trataremos de aportar datos e hipótesis que den cuenta de los rasgos observados y de los procesos que han intervenido en su génesis.

Otro aspecto que no hemos podido resolver en forma enteramente satisfactoria, ha sido el de evitar la repetición de algunas ideas expuestas en trabajos previos, pero el tema así lo requiere. Sin embargo, la presente nota no es una mera recapitulación. Presenta descripciones, ideas y datos nuevos, que van más allá de los expresados antes, o bien suministran perspectivas nuevas, por el hecho de centrarse alrededor de un tema, en este caso los diversos tipos de cuevas y grutas hallados.

ANTECEDENTES

El flysch Eoceno del litoral de Gipuzkoa presenta un pseudokarst desarrollado en areniscas cuarzosas de cemento carbonático. Su mayor desarrollo y sus más prominentes formas se localizan en los bancos más compactos de arenisca de la parte superior de la secuencia, en zonas de buzamiento bajo a medio. Una descripción general de este pseudokarst ha sido presentada antes en GALAN et al. (2007a, 2007b). En trabajos sucesivos han sido expuestas descripciones más detalladas de

formas pseudokársticas en el relieve de superficie (cañones, acantilados, depresiones), así como de diversas cavidades, geoformas y estructuras de corriente presentes en las turbiditas (GALAN et al., 2008a, 2008b, 208c). Cabe destacar que la secuencia de sedimentos turbidíticos del flysch Eoceno tiene un espesor total considerable, de 1.000 á 1.500 m. De igual modo, muchas geoformas (como grandes sistemas de celdas en panal de abejas, boxworks, nódulos esféricos y formas cordadas) presentan características remarcables. En varios casos se trata de formas originales y típicas de esta litología, en otros, constituyen algunos de los mejores ejemplos conocidos en su tipo a nivel mundial.

La prospección de enclaves de difícil acceso ha permitido entender mejor los factores y procesos que controlan la distribución de cavidades y geoformas, así como otros aspectos que interrelacionan el modelado del relieve con el desarrollo del pseudokarst. En esta nota vamos a referirnos a los diversos tipos de cavidades existentes, hasta ahora prospectadas, explicando sus características e ilustrando las descripciones con fotografías.

RESULTADOS

CONTEXTO GEOLOGICO

El flysch Eoceno (CAMPOS, 1979) es interpretado como un depósito de sistemas turbidíticos. Se compone de potentes bancos de arenisca que presenta intercalados delgados niveles de lutitas. El grosor de los estratos de arenisca, de varios metros, aumenta de abajo hacia arriba. El pseudokarst se desarrolla en la parte superior de la secuencia Eocena, donde los estratos de arenisca alcanzan mayor espesor (2 á 8 m) y reposan prácticamente unos sobre otros.

Litológicamente son areniscas cuarzosas, de variados colores claros (blancas, amarillas, anaranjadas, rosadas y ocres), y de cemento carbonático. Las areniscas están formadas por un entramado de granos de cuarzo (bien redondeados a ligeramente angulosos), que pueden constituir hasta el 90% de la roca (siempre más del 80%), cantidades minoritarias de feldespatos y micas (en torno al 1%), unidos por una matriz o cemento carbonático.

El tamaño medio de grano se hace mayor hacia la parte alta de la serie. Los estratos presentan mayoritariamente laminación paralela y laminación disturbada (= convoluted beds), a menudo de distinta coloración; también se observan estructuras formadas durante la compactación (discos y pilares) y diversas estructuras de corriente. Son frecuentes nódulos esféricos o bolas de arenisca más dura, de variable diámetro, desde unos pocos hasta más de 70 cm. Estos nódulos están rellenos de cuarzo de grano medio a grueso, con matriz carbonática, muy poca mica y glauconita.

Intercalados entre los estratos de arenisca se encuentran niveles delgados de lutitas y margas carbonáticas, con cierto grado de pizarrosidad. En las zonas de pseudokarst los niveles de lutitas faltan o son tan finos que los estratos de arenisca se apoyan prácticamente unos sobre otros. Esta preponderancia de areniscas compactas, dispuestas en bancos gruesos, no ocurre en toda la secuencia, sino en relieves prominentes de la parte superior de la serie (de finales del Eoceno inferior).

PSEUDOKARST EN ARENISCA

Conviene precisar en primer lugar nuestra elección del término pseudokarst. Clásicamente se entendía que los *fenómenos kársticos* eran aquellos debidos a la disolución de rocas geológicamente solubles (como caliza y yeso), mientras que los *fenómenos pseudokársticos* eran producto de acciones físicas y químicas (desintegración termoclástica, hidrólisis de feldespatos, etc.) en rocas insolubles o muy poco solubles, como granito, gneis, esquistos y lavas, las cuales presentan algunas formas de superficie análogas a aquellas de terrenos kársticos, como lapiaz, cavernosidades, etc. (HALLIDAY, 1960; GEZE, 1973; MONROE, 1970). Sin embargo, formas de superficie y formas de disolución pueden presentarse en casi cualquier tipo de roca, sean estas más o menos solubles (MARTINI, 1982; HOLMES, 1965; URBANI & SZCZERBAN, 1975; GALAN, 1991).

El karst se caracteriza por constituir un sistema de drenaje subterráneo, con una estructura subterránea y a la vez una morfología de superficie asociada. Lo esencial del karst reside en que se logre establecer un sistema de drenaje subterráneo que a la vez ocasione la desaparición más o menos completa del drenaje superficial, independientemente de la solubilidad de las rocas involucradas (BAKALOWICZ, 1982; GALAN, 1991). Las formas de superficie pueden ser consideradas kársticas o pseudokársticas en función de si existe o no un karst desarrollado.

MAIRE (1980) clasifica a las areniscas carbonáticas como rocas compuestas poco favorables a la karstificación, en razón de que están formadas por granos de arenas silíceas (cuarzo) soldadas por un cemento carbonático. La disolución del cemento carbonático conduce a una arenización (= descomposición en arena) poco favorable a la karstificación. Por otro lado, hasta hace relativamente poco tiempo, las areniscas de cemento silíceo (= cuarcitas) eran juzgadas teóricamente inkarstificables. Sin embargo, en las últimas décadas, y particularmente con el progreso del conocimiento del karst en cuarcita, ha sido puesto de relieve que en el caso de rocas silíceas como las cuarcitas del Grupo Roraima, en Venezuela y Brasil (URBANI, 1981, 1986; GALAN, 1991; GALAN & LAGARDE, 1988; GALAN & HERRERA, 2005, 2006), o de Black Reef y Grupo de Wolberg, en Sudáfrica (MARTINI, 1982, 1987), pueden coexistir extensas zonas sin karst (con drenaje normal) junto a áreas locales intensamente karstificadas (con sistemas de drenaje subterráneo), mientras que las formas de superficie pueden ocurrir sobre ambas.

El flysch Eoceno del litoral de Gipuzkoa presenta un pseudokarst en areniscas cuarzosas de cemento carbonático. Alcanza su mayor desarrollo en los bancos más compactos de arenisca de la parte superior de la secuencia, en zonas de buzamiento bajo a medio. En las imágenes, lajas costeras con escarpes debidos a colapsos por descompresión mecánica y erosión marina.

Pseudokarst en arenisca del flysch Eoceno. La mayor cantidad de grutas y cuevas se localizan en paredes verticales y cornisas que forman prominentes escarpes en el relieve de superficie. Muchas de ellas poseen notables geoformas.

Nuestro caso se asemeja en muchos aspectos al karst en cuarcita. Tanto las areniscas del flysch Eoceno como las cuarcitas antes citadas, están compuestas mayoritariamente (más del 80% hasta el 96%) por granos de cuarzo, residiendo la principal diferencia en que el cemento intergranular es carbonático en el primer caso y silíceo en el segundo. La disolución puede verse facilitada en la arenisca, pero la remoción del material por disolución está restringida en ambos casos al 10-20% del volumen de roca; lo cual contrasta claramente con el karst clásico en caliza, donde la disolución generalmente afecta al 80% o más del volumen de roca. En la arenisca del flysch Eoceno existen numerosas pequeñas cuevas, grutas, geoformas, circulaciones de aguas subterráneas, manantiales, etc., pero están faltando auténticas redes de drenaje subterráneo y cavernas asociadas. La morfología y topografía de superficie puede decirse que es normal. Por todo lo cual preferimos utilizar el término pseudokarst. No obstante, somos de la opinión de que está abierta la posibilidad de descubrir ejemplos de cuevas y drenajes subterráneos mayores y más extensos que los hasta ahora conocidos.

DISOLUCION EN ARENISCA DEL FLYSCH EOCENO

Los procesos que generan cavidades y geoformas en la arenisca incluyen meteorización química (disolución, alteración de los minerales, procesos bioquímicos), erosión normal y marina, procesos clásticos, erosión eólica, y combinaciones de varios de ellos actuando simultáneamente (GALAN, 2001; GALAN et al., 2007a). En este conjunto de procesos la meteorización química resulta ser el factor fundamental. La meteorización disuelve, altera y disgrega la roca compacta, tornándola friable e incoherente, y facilita la remoción y transporte de los granos de cuarzo o fragmentos poco solubles de otros minerales. Actúa mayoritariamente sobre la matriz o cemento carbonático y en menor proporción sobre los granos silíceos.

La disolución del cemento carbonático procede químicamente como en la caliza, por acción de las aguas meteóricas cargadas de CO_2 y ácidos del suelo. Pero además de actuar a través o a partir de discontinuidades de la roca (diaclasas y planos de estratificación), lo más significativo es que actúa intergranularmente, disolviendo el cemento. También puede disolver un pequeño porcentaje de cuarzo. Aunque la tasa de solubilidad de la sílice es muy baja, su tasa de disolución es también muy baja. Y ello permite que cuando el agua circula intergranularmente (circulación muy lenta, debido a su viscosidad), puede permanecer subsaturada y disolver lentamente parte de los granos de cuarzo (MARTINI, 1982). Los feldespatos y micas (incluidos en la arenisca en cantidades minoritarias) son rápidamente alterados, produciendo minerales de la arcilla, fácilmente removibles. Así, al progresar la disolución intergranular, la roca se meteoriza y descohesiona, tornándose de compacta a frágil e incoherente, con los granos individuales de cuarzo casi sueltos. Esta progresiva arenización de la roca, permite entonces la remoción de volúmenes mayores de roca; pero obsérvese que para generar cavidades es necesario que se produzca una alteración diferencial, ya que en caso contrario la roca sería transformada simplemente en arena, sin generar cavidades ni geoformas subterráneas.

La disolución intergranular constituye así el proceso básico. Entre los factores que contribuyen a la alteración diferencial, hemos constatado que diversas soluciones de hierro y sílice secundaria pueden precipitar, recementando la roca (GALAN et al., 2007b). Procesos de humectación-desecación contribuyen a crear mallas endurecidas, de roca recementada o no-disuelta, más resistente a la erosión, junto a áreas blandas y porosas, más fácilmente solubles y erosionables. La permeabilidad en pequeño del acuífero intergranular en la arenisca (= aquitard) es controlada por una suma de factores hidrológicos, geoquímicos y dinámicos, los cuales evolucionan con el tiempo en relación con el modelado externo, este último bajo control del dispositivo litológico y estructural. De esta forma son generadas cavidades, cuyas principales características veremos a continuación.

TIPOLOGIA GENERAL DE LAS REDES PSEUDOKARSTICAS EN EL FLYSCH EOCENO

Hemos agrupado las cavidades en varios tipos principales, basados en su morfología, hidrología y posición. En general se trata de redes de escasa desnivelación y corta distancia-vertiente, es decir, poco profundas con relación a la superficie topográfica externa. Sin embargo ocupan un área considerable en los afloramientos, con una densidad de cavidades localmente muy alta.

En la tipología general de redes subterráneas (MAIRE, 1980), corresponden a cavidades en estructura monoclinal, y se forman preferentemente sobre escarpes recortados por fracturas subverticales. Están situadas a moderada altitud (entre 0 y 400 m snm), en una región de clima atlántico, húmedo y brumoso, con la lluvia bien repartida a lo largo del año (1.800 mm de lluvia anual). Según su grado de evolución son redes jóvenes, poco evolucionadas, ya que su desmantelamiento y destrucción también progresa con rapidez; no obstante, muchas de ellas se presentan en relieves con rasgos parcialmente heredados de fases climáticas anteriores (pre-Holocenas), o que han experimentado una alternancia de condiciones áridas y húmedas durante el Cuaternario. En la línea de costa, la formación de cavidades es un proceso activo, en el que también interviene la erosión marina, muy potente en el litoral Cantábrico.

1. Cavidades epidérmicas.

Se desarrollan a escasos metros de la superficie y son de moderadas dimensiones. Generalmente forman grutas y abrigos, amplios pero poco profundos. A menudo sus partes internas alcanzan considerable altura, estando cerradas por paredes y tabiques laterales y superiores, donde con frecuencia se presentan puentes de roca, columnas, tubos y ventanas laterales.

En esta categoría pueden incluirse también abrigos de erosión marina. En este caso han sido formados por la acción basal del oleaje, la cual ha desgastado intercalaciones de estratos delgados de lutitas y margas, o simplemente ha erosionado un plano de estratificación débil, produciendo el colapso de un tramo de la bóveda, que luego ha sido removido por acción del mar. Algunos de estos abrigos alcanzan más de 20 m de anchura y profundidad, estando sus techos soportados por estratos resistentes.

En ambos casos hay ejemplos de desarrollo de pequeñas galerías internas, que profundizan siguiendo fracturas o planos de estratificación. Es frecuente también que se amplíen hasta resultar desmantelados, conformando entonces formas residuales: simples paredes o concavidades expuestas, más o menos arenizadas, y con sólo restos de algún reborde protector y vestigios de antiguas geoformas. Sus suelos suelen conservar depósitos de arena fina, producto de la meteorización de la roca.

2. Cavidades en burbuja y cascarones huecos.

Son cuevas cuyas bocas son de pequeño diámetro, y dan paso a salas mucho más espaciosas, a menudo con prolongaciones. Estas se localizan preferentemente en el estrato superior de escarpes verticales y pueden evolucionar hasta vaciar éstos casi por completo, dejando sólo una especie de cascarón hueco, con delgadas paredes fuertemente cementadas. Habitualmente albergan diversas geoformas (formas alveolares y coraloides, celdas en panal de abejas, boxworks y formas cordadas), en ocasiones de grandes dimensiones y cubriendo las superficies internas de las cuevas.

Es común que las salas internas presenten conductos tubulares (galerías) y ventanas, de pequeño diámetro, en comunicación con otras salas anexas o con la superficie. Por su posición fisiográfica, su cobertura superficial está fuertemente recementada por carbonatos, ya que queda expuesta a insolación y a condiciones alternas de humectación-desecación.

3. Cavidades instaladas sobre rasgos tectónicos.

Se desarrollan sobre sistemas de diaclasas, planos de estratificación, y en la intersección de ambos, puntos éstos propicios para la infiltración y circulación de las aguas meteóricas. Adicionalmente, los estratos individuales más compactos de arenisca se fracturan mecánicamente por descompresión de la roca en la vecindad de vacíos. Así, en las cercanías de escarpes verticales y acantilados la densidad de fracturas se incrementa. A partir de estas vías de penetración del agua, la disolución de la roca progresa, ampliando las fracturas y discontinuidades.

La mayoría de estas cuevas son de trazado simple, formadas por ampliación de diaclasas verticales, pero pueden también dar lugar a trazados en bayoneta, que siguen la orientación de redes ortogonales de fracturas. Su sección generalmente se amplía en la base, al alcanzar un plano de estratificación compacto, que actúa de suelo. Aunque existen algunas galerías subterráneas formadas a expensas de la estratificación, generalmente son escasas, ya que el peso de los estratos superiores tiende a producir el aplastamiento de los vacíos formados. Las cuevas exploradas de este tipo tienen un desarrollo de algo más de una decena de metros. Una de ellas, colgada en la pared interna de un cañón (a 10 m sobre el suelo y 8 m bajo el tope), posee una galería que penetra horizontalmente 15 m, hacia otra diaclasa bajo el fondo de un zanjón contiguo.

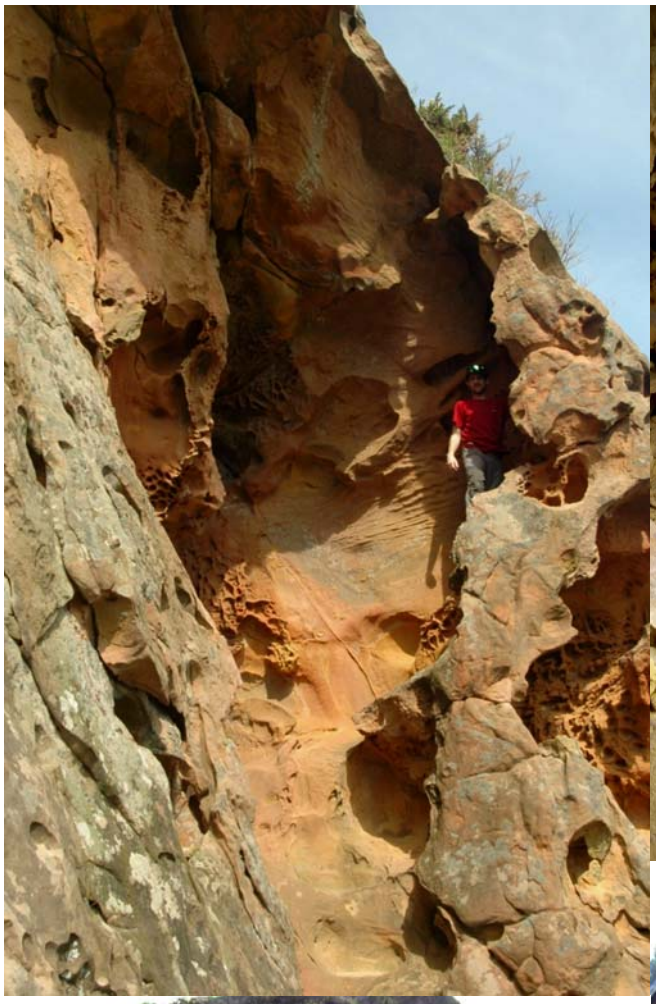
Por último hay ejemplos de redes mixtas, de varias decenas de metros de desarrollo (con zonas internas en oscuridad total), en los que las aguas subterráneas han excavado galerías entre fracturas y planos de estratificación, incluyendo casos con marmitas de evorsión producto de abrasión turbillonar. Algunos ejemplos en Urberde (Igueldo), situados en la línea de costa, están sometidos a una acción erosiva doble, por flujos subterráneos de agua dulce y por ingreso de agua marina por acción de las mareas y el oleaje. Cabe mencionar que la amplitud de las mareas en esta parte del Cantábrico es de 4,5 m y con ocasión de temporales y mar de fondo las olas alcanzan 7 m de altura y llegan a proyectar en las rompientes agua marina hasta cotas de 20 m snm. Las zonas bajas de estas redes están sometidas así a una erosión mecánica por el choque de las olas y a una disolución compleja por el agua de mar y por flujos de agua dulce. En estas zonas la humectación por las salpicaduras del oleaje produce también en superficie microrelieves muy acusados, que pueden llegar a constituir un auténtico microlapiaz litoral.

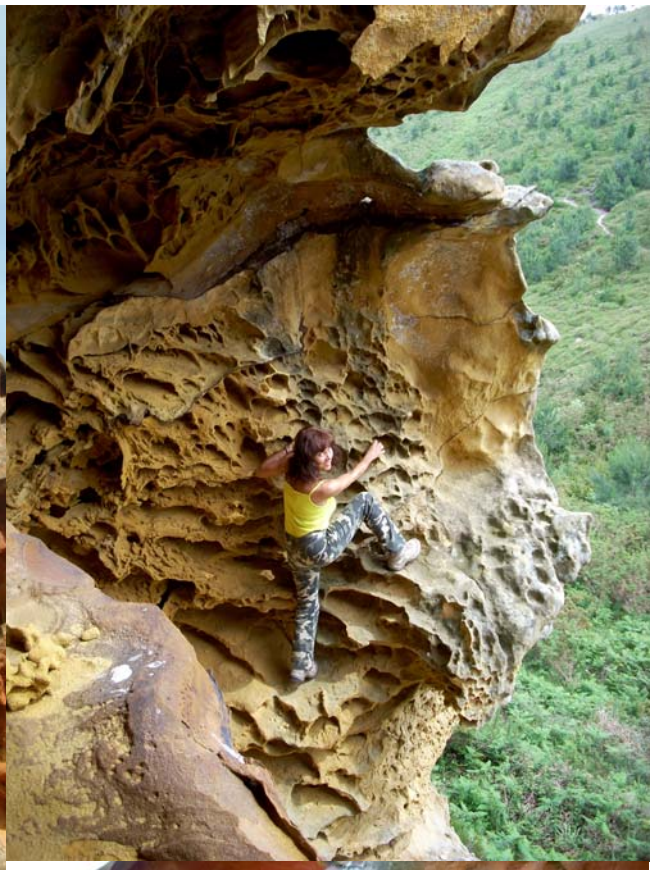
4. Cavidades en bloques de recubrimiento.

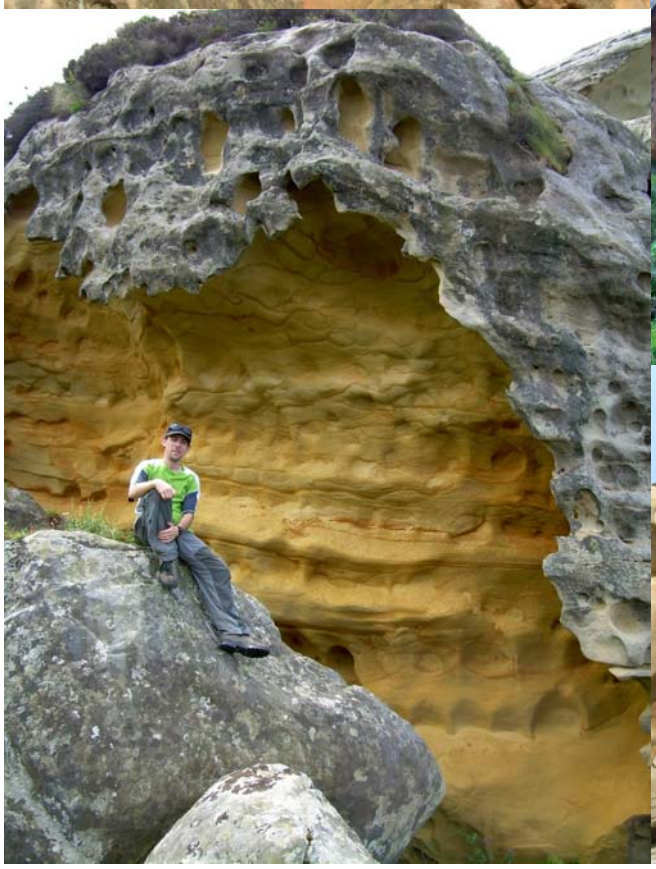
Son simplemente cavidades y abrigos que quedan entre los espacios que dejan libres grandes bloques de desprendimiento o colapso. La apertura mecánica de fracturas por descompresión mecánica se ve facilitada en la vecindad de escarpes, tanto en el frente y entrantes del litoral marino, como sobre el flanco de los valles. Los bloques colapsados conforman sistemas de túneles, corredores y cuevas de recubrimiento, de complejo desarrollo. También se producen fracturas subhorizontales, controladas en parte por la estratificación, causadas por la descarga de peso (= weight release o descompresión de superficie). Adicionalmente, muchas fracturas abiertas son ampliadas en su parte externa por exfoliación.

En algunos casos los corredores se desarrollan sobre un estrato resistente, sobre el cual reposa el relleno de bloques, hecho frecuente en las lajas litorales. Pero más a menudo el recubrimiento es caótico, y el agua de lluvia se infiltra entre el relleno de bloques, sin fondo aparente, aunque obviamente debe circular a un nivel inferior. Particularmente, en el interior de cañones y depresiones pseudokársticas, la elevada humedad aportada por la cubierta vegetal y edáfica facilita la meteorización de los bloques desprendidos y el progresivo rebajamiento del relleno, formando caos tridimensionales. Estas redes pueden incluir tramos de pequeñas galerías retocadas y ampliadas por disolución y erosión.

Existe también lo que podría denominarse “cavidades en y entre bloques tafonizados”. Generalmente se trata de grandes bloques prismáticos, de varios metros de lado, producto del desmantelamiento o colapso de los estratos superiores de la serie. Muchos de ellos presentan sus partes basales y externas arenizadas y excavadas por abrigos, concavidades y alveolos, los cuales



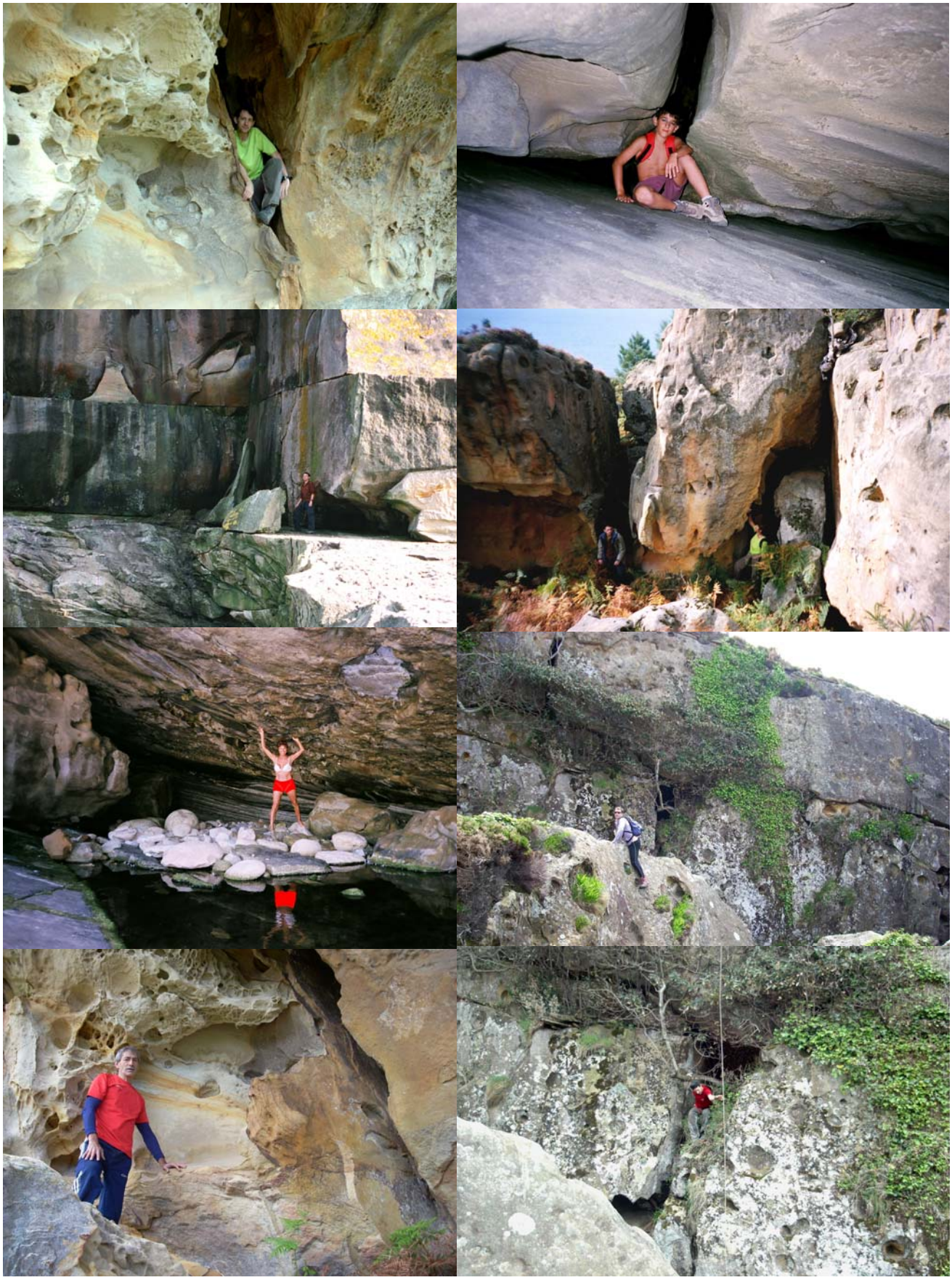




Cavidades epidérmicas. Son de poco fondo y generalmente presentan cierto desarrollo en altura. No obstante, también hay grutas que aprovechan discontinuidades en la estratificación, extendiéndose en anchura, con formas circulares.

Cavidades en burbuja. Generalmente están situadas en el estrato superior, más expuesto a la insolación, y forman cámaras seudo-esféricas, con bocas de acceso y ventanas de moderado o pequeño diámetro. En sus paredes y bóvedas internas la roca se presenta arenizada y con geoformas, mientras que en las superficies externas la roca está fuertemente recementada, formando un cascarón o cubierta protectora.

Otros ejemplos de cavidades tipo burbuja.



Cavidades instaladas sobre rasgos tectónicos. Se desarrollan sobre diaclasas, planos de estratificación, o en la intersección de ambos. Las dos imágenes de la mitad inferior derecha corresponden a una cavidad colgada en la pared interna de un cañón. En la tercera fila, lado izquierdo, se presenta también la imagen de un abrigo de erosión marina excavado a expensas de intercalaciones de lutitas.

pueden llegar a vaciar buena parte del volumen del bloque. En los amontonamientos de este tipo de bloques se forman redes de pasadizos, seudogalerías y cuevas, con zonas en oscuridad. En todo caso, se trata de abrigos y cuevas de modestas dimensiones, pero que difieren en su morfología de las simples cuevas de recubrimiento bajo bloques clásticos poco alterados.

5. Cavidades hidrológicamente activas.

Son cavidades recorridas por corrientes de agua subterránea, temporales o permanentes, y su morfología es comparable a la de las cuevas normales del karst clásico en caliza.

Hasta ahora el ejemplo más conspicuo que hemos encontrado corresponde a una cueva hidrológicamente activa, de 70 m de desarrollo, situada en la zona central de Jaizkibel en el fondo de un vallecito recorrido por un pequeño arroyo perenne. Se trata de una cueva-sumidero, formada por disolución, a expensas de un plano de estratificación. Inicialmente forma un abrigo de 20 m de ancho, 8 m de fondo y 2 m de altura, y prosigue en galería en zona oscura por espacio de 40 m hasta una obstrucción por colapso de bloques. La sección de esta galería tiene 3 m de ancho x 1,5 m de alto, con suelos arenosos, y es recorrida por el arroyo subterráneo. Posee un lateral ascendente, de 10 m, por el que también ingresa algo de agua. La cavidad presenta películas milimétricas de espeleotemas, de varios colores, de calcita y otros minerales secundarios en proceso de estudio.

En el interior de pequeños cañones hemos encontrado algunas cuevas similares, de menor tamaño. En cambio, son frecuentes las surgencias de flujos laminares de aguas subterráneas, particularmente en la base de acantilados sobre lajas costeras. En estos casos los tramos penetrables son muy reducidos, probablemente debido a que no se consigue concentrar la infiltración dispersa para producir la tubificación de la roca (= piping) y la formación de galerías.

6. Cavidades en la base de escarpes verticales.

En la región existen numerosos escarpes verticales, formados por erosión diferencial de las litologías más blandas y retroceso de las vertientes. Estos relieves contienen paredes verticales y extraplomadas, de 20-50 m de desnivel, las cuales siguen el buzamiento de los estratos, a lo largo del flanco de los valles, por espacio de centenares de metros. En algunos barrancos prominentes, de hasta cerca de 150 m de desnivel de sus laderas, pueden formarse escarpes escalonados de roca, con paredes superpuestas, separados unos de otros por abruptos taludes con vegetación.

En la base de las paredes, siguiendo los planos de estratificación, se forman gran número de abrigos, fajas o cornisas techadas y algunas cuevas. La arenisca presenta en estos enclaves, paredes y bóvedas arenizadas por disolución intergranular. En el interior de las cavidades resulta perfectamente apreciable la coloración y estructura primaria de las areniscas, con numerosas y muy diversas laminaciones y estructuras de corriente. Así mismo son muy frecuentes y numerosas las formas alveolares, grandes celdas en panal de abejas, boxworks, y nódulos esféricos. La variedad de cavidades es enorme y puede ir desde simples abrigos hasta cuevas de moderado desarrollo. Nuestras observaciones sugieren que la formación de cavidades predomina en la parte inferior y lateral de los estratos individuales más compactos de arenisca, en aquellos puntos donde se ve facilitada la salida del agua intergranular. No obstante, la diversidad de situaciones es enorme, existiendo cavidades mixtas y formas complejas.

7. Cavidades colgadas en paredes y cornisas.

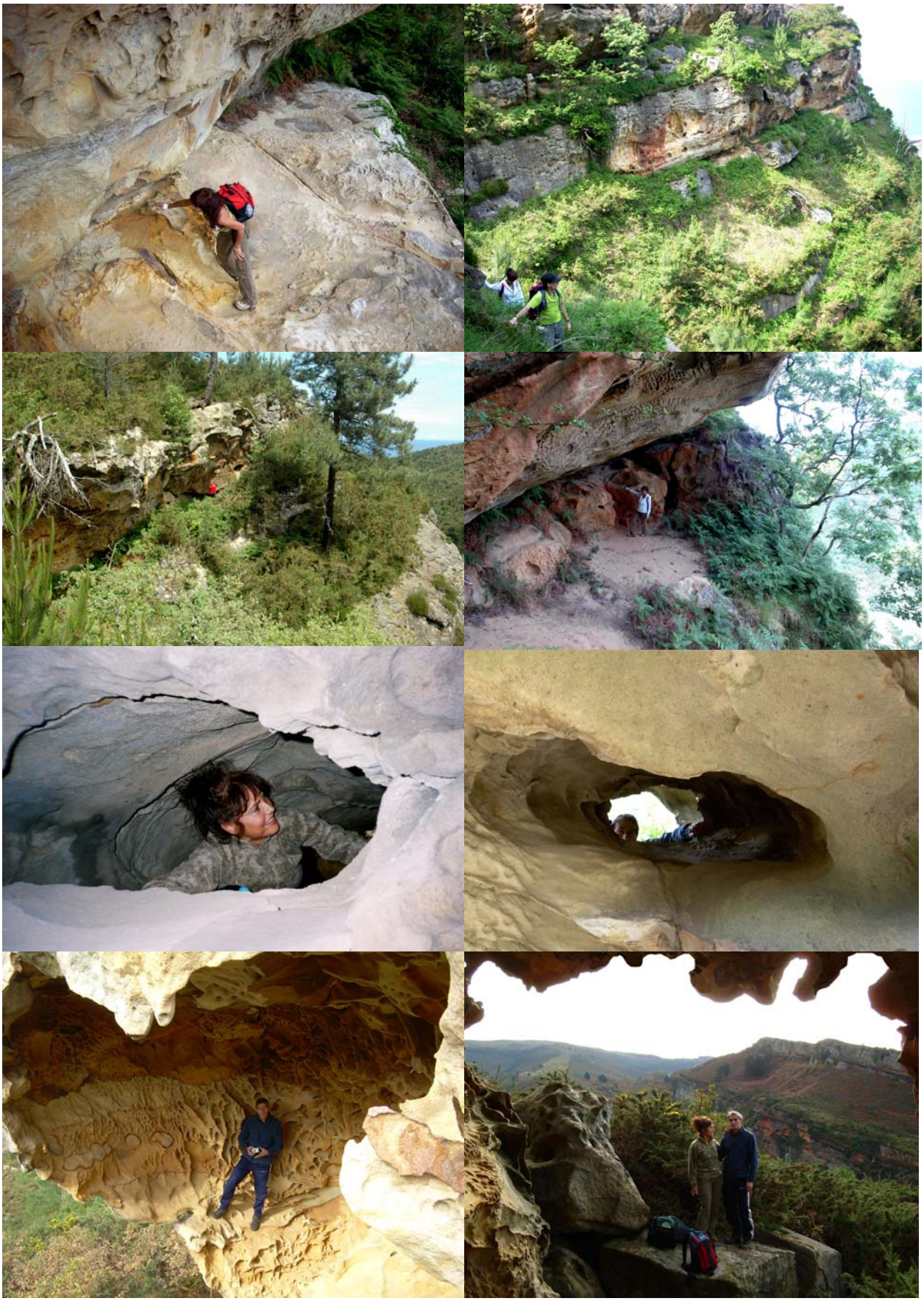
Se localizan a diversas alturas en los escarpes señalados en el apartado anterior. En general se trata de cavidades parecidas a las anteriores (punto 6), pero resultan ser menos numerosas, más grandes, y profundizan más hacia el interior de la roca. De igual modo, la presencia de geoformas alcanza su mayor expresión y espectacularidad en ellas. La arenisca en su interior suele presentarse en avanzado estado de arenización. Las geoformas que tapizan las paredes interiores son de singular belleza, cubren amplias superficies, y alcanzan gran tamaño. Los nódulos y estructuras discoidales pueden quedar en relieve positivo o ser también arenizados, dando lugar a geoformas, las cuales incluyen formas cordadas, grandes boxworks y celdas en panal de abejas (honeycomb cells), a veces con tabiques muy delgados separando profundas celdas poligonales.

El proceso de arenización en estas cuevas es por demás evidente, existiendo numerosos depósitos de arena fina sobre cada saliente, cornisa o plano horizontal. Y la roca en muchos lugares se disgrega por simple fricción. Se puede apreciar que son cavidades secas, protegidas de la intemperie, donde la excavación del volumen rocoso no es comandada por la acción de flujos superficiales de agua ni por la acción del viento, sino por procesos de disolución intergranular, que progresan desde el interior de la roca hacia la parte externa. A la vez, las mallas de geoformas, a menudo remarcables, muestran también que la alteración de la roca es diferencial, coexistiendo mallas o redes de tabiques más resistentes, en muchos casos posiblemente recementadas por sílice secundaria, junto a áreas blandas, donde la mayor parte del cemento carbonático ha sido removido.

Como detalle de interés espeleológico diremos que el acceso a estas cavidades colgadas en paredes verticales no es simple, y requiere o bien escalar desde su base o bien descolgarse con técnica de rappel y jumars. Aunque la roca externa es compacta, los rebordes de las bocas son frágiles y quebradizos. Las escaladas se complican por la escasez de buenos puntos donde asegurarse y la fragilidad de muchas presas. En los descensos es común efectuar péndulos, ya que las paredes suelen ser extraplomadas. Los jumars resultan útiles tanto a la hora de retirarse (evitando el descenso completo y un largo rodeo) como para completar asegurados recorridos de cornisas y cuevas colgadas anexas. En adición hay que tener en cuenta que en los puntos de roce, la roca resulta mucha más abrasiva para las cuerdas que en la caliza.

Cavidades en bloques de recubrimiento. Se presentan entre acumulaciones de bloques de desprendimiento, en zonas deprimidas (imágenes fila superior) y en taludes al pie de escarpes verticales (imágenes fila inferior). También se presentan en peñascos y bloques producto del desmantelamiento del estrato superior, pudiendo vaciar gran parte de sus volúmenes. En ocasiones se trata de espacios entre bloques solo ligeramente meteorizados, mientras que otras veces albergan numerosas geoformas.

Cavidades hidrológicamente activas. Unos pocos ejemplos de este tipo han sido hallados en el interior de pequeños cañones (imagen superior izquierda) recorridos por cursos de agua. Una de ellas posee una galería con un río subterráneo, de 70 m de desarrollo, y contiene diversas espeleotemas, de calcita y otros minerales en proceso de estudio. El ambiente hipógeo y de la zona de entrada de la cavidad, a la cual corresponden las fotografías, es de elevada humedad.



Cavidades en la base de escarpes verticales. Pueden formar simples abrigos, cornisas y fajas techadas, que siguen los estratos en la base de los escarpes por centenares de metros. A menudo poseen abrigos más amplios, grutas y cuevas, con galerías subterráneas. En la imagen inferior derecha se observan cuevas colgadas en otros escarpes, al fondo.

FACTORES QUE CONTROLAN LA FORMACION DE CAVIDADES

La disolución intergranular es responsable de la formación de abrigos, grutas, cuevas, y, dentro de ellas, de la formación de geoformas, desde pequeños alveolos hasta grandes formas coraloides, celdas en panal de abejas, box-works y formas cordadas. La arenización en el interior de las cavidades también pone al descubierto delicados dibujos y diseños de estructuras de corriente de las turbiditas, nódulos y vetas de distinto tipo. Patrones complejos resultan de la intersección entre el relieve interno de las cavidades y la geometría de las geoformas, con llamativos efectos estéticos.

Un modelo teórico general ha sido propuesto para explicar la formación de cavidades y geoformas (GALAN et al., 2007a, 2007b). Este modelo básicamente postula que la formación de cavidades, alveolos y celdas es un proceso de alteración diferencial, debido a la alternancia de fases de humectación con otras de desecación. La alteración procede por disolución intergranular: durante las fases húmedas o lluviosas el agua penetra cierta distancia a través de la porosidad de la roca y disuelve a su paso parte de la matriz o cemento carbonático; durante las fases secas, el agua fluye a través de los poros y se evapora de la roca; de este modo parte del carbonato disuelto es conducido hacia la superficie, donde puede formar una dura y compacta zona externa. El proceso de evaporación causa que el carbonato remanente en el interior de la roca se distribuya desigualmente, dando lugar a áreas blandas y duras, con bajo y alto contenido en carbonato, respectivamente. Si la superficie externa de la arenisca es erosionada, fracturada o rota, las partes suaves del interior se erosionarán más fácilmente que las duras, formando cavidades y formas alveolares (MARTINI, 1978; MUSTOE, 1982; TWIDALE, 1982). Las delicadas estructuras en panal de abejas y box-works, con intrincados patrones laberínticos de aristas y celdas, resultan de las diferentes tasas de erosión de las áreas duras y blandas en el interior de la arenisca.

Nuestras observaciones de campo sugieren que la penetración y circulación intergranular del agua es condicionada por la porosidad de la roca, debida a la estructura primaria de las areniscas. En las fases iniciales debe ser muy lenta y debe actuar sólo a débil profundidad con respecto a la superficie. El incremento de la porosidad efectiva debe ser más rápido en las zonas de evacuación o emergencia de las soluciones intergranulares. En estas lentas fases iniciales, al igual que ocurre en el karst en cuarcita (de cemento silíceo), debido a su viscosidad el agua puede permanecer subsaturada con respecto a la sustancia sólo si la tasa de disolución es baja. Este es el caso para el cuarzo, pero no para la calcita (MARTINI, 1982). Por ello, en las fases más tempranas del proceso o en las zonas internas de la roca donde las circulaciones sean más lentas, la sílice de los granos de cuarzo pueda ser disuelta parcialmente, en pequeñas cantidades. Igualmente se produce la alteración y meteorización de los feldespatos y micas contenidos en la matriz. Esta meteorización se produce con facilidad en ambiente húmedo cargado de CO_2 y genera carbonatos y silicatos alumínicos hidratados. El aspecto y coloración de algunas vetas sugieren también la disolución y removilización de hierro, el cual puede contribuir a la cementación. Obviamente, los carbonatos pueden ser disueltos por el agua cargada de CO_2 con gran facilidad. Las reacciones ocurrirán en función del tiempo de residencia del agua en el acuífero intergranular, y progresarán con mayor facilidad al aumentar las áreas disueltas y, por consiguiente, la porosidad efectiva.

Los pequeños alveolos pueden formarse por remoción simple del cemento carbonático, pero creemos que los grandes alveolos u hojaldres tipo box-work deben estar también soportados por silicificaciones locales. En la hipótesis expuesta, la formación de áreas duras y blandas, y la formación de mallas y láminas resistentes, se debe así a la existencia de silicificaciones y enriquecimientos en hierro a lo largo de microfisuras, las cuales endurecen esa parte de la roca, haciéndola más resistente a la arenización posterior. De modo similar, durante las fases de desecación, puede producirse la retracción o precipitación de parte del carbonato disuelto, y la formación de mallas de material recementado o no-disuelto; estas mallas serán la base para que progrese la creación de tabiques entre celdas.

Algunos análisis hechos sobre muestras de roca por vía húmeda (GALAN et al., 2007b) permiten interpretar que la mayor parte del cemento carbonático es en efecto disuelto y evacuado; en menor proporción parte de la sílice de los granos de cuarzo es también disuelta; los feldespatos y micas (contenidos en la arenisca en cantidades minoritarias) son alterados casi en su totalidad. Así mismo se producen enriquecimientos en hierro, aluminio, y sílice secundaria, que contribuyen a la creación de mallas más resistentes que sirven de soporte a geoformas.

Otro aspecto a considerar es que la disolución y meteorización de la roca también actúa en superficie. Para que se formen cavidades es necesario que en el interior de la roca la arenización progrese más rápidamente que en superficie. De otro modo la roca sería rebajada y reducida a arena, sin formar cavidades. Las observaciones de campo muestran que la localización de cavidades ocurre en general en las partes laterales externas e inferiores de los estratos individuales y de grandes bloques desprendidos, es decir, en los puntos naturales de más fácil salida del agua intergranular. Estas zonas, de surgencia a pequeña escala, permiten evacuar los minerales disueltos, aumentan la red de vacíos en el volumen de roca, y evolucionan hasta formar cavidades y geoformas en su interior. Debido a que las zonas arenizadas son progresivamente removidas, la ampliación de las cavidades progresa. Pero obsérvese que, con el paso del tiempo, zonas que hoy son resistentes pueden ser también arenizadas subsecuentemente. De hecho, hemos observado en nódulos esféricos compactos, todas las fases intermedias de progresiva arenización, formación de alveolos y remoción de la roca-caja. Es decir, el proceso de arenización puede extenderse incluso a zonas aparentemente bien cementadas y resistentes. Es probable que las cavidades persistan por más tiempo precisamente en las rocas más duras y compactas.

Cavidades colgadas en escarpes verticales. Se localizan a diversas alturas sobre las paredes de escarpes verticales de hasta 40-50 m de desnivel. En ocasiones es posible ascender escalando otras veces hay que descender con técnicas de cuerda estática y jumars. Poseen cuevas con profusión de remarcables geoformas.

Secuencia de descenso y escalada hasta cavidades colgadas en escarpes verticales bajo extraplomos. Algunas de ellas contienen cavernas con espectaculares geoformas.

Con tiempo suficiente todas las zonas externas y bloques enteros son recortados, vaciados y removidos, incorporándose a la evolución general de superficie. Este carácter relativamente superficial y temporal de las formas encontradas es lo que hace de ellas un pseudokarst y no un karst desarrollado.

La infiltración y el drenaje subterráneo ocurren hasta corta distancia con respecto a la superficie. La existencia de diaclasas y planos de estratificación, y la creación de fracturas por descompresión en zonas de borde, facilitan la infiltración de agua en el interior de la roca. A partir de estas vías el agua penetra intergranularmente, produciendo la disolución intergranular y la progresiva decementación (arenización) de la roca. En las zonas de borde, con mayor densidad de fracturas, el proceso de arenización puede extenderse hacia abajo y lateralmente hasta intersectar un vacío externo, a una cota inferior. De este modo, al establecerse un sistema de drenaje del agua intergranular, los minerales disueltos pueden ser evacuados, ampliando progresivamente la red de vacíos. Este parece ser el proceso primario. El crecimiento volumétrico posterior de las cavidades puede ser influido por leves variaciones en los equilibrios geoquímicos y dinámicos. Pero el proceso básico es el mismo y controla las diversas formas generadas, desde pequeños alveolos hasta grandes abrigos, grutas y cuevas.

En los tipos de cuevas encontradas, diversas galerías se instalan sobre discontinuidades estructurales y estratigráficas (diaclasas y planos de estratificación), donde la circulación del agua subterránea se ve facilitada, y procede en forma semejante al karst en caliza. Pero a la vez la disolución avanza intergranularmente a través del volumen de roca, descohesionando las zonas en que penetra. La evacuación lateral de las aguas del acuífero intergranular hacia la base de los escarpes y de los estratos individuales de arenisca, facilita la creación de redes de cavidades epidérmicas y otras mayores y a menudo colgadas en los estratos más compactos. En su tope y a nivel de los estratos superiores, la evaporación se ve incrementada por insolación directa, forzando también un flujo intergranular ascendente que precipita con mayor facilidad generando una capa dura externa a la vez que múltiples cavidades en forma de burbuja o cascarones huecos. En grandes peñones y bloques del estrato desmantelado más superficial también se producen cavitaciones de este tipo. Pero obsérvese que siempre el progreso del cavernamiento está condicionado por los puntos de salida del agua intergranular. En las depresiones topográficas (como cañones, zanjones, dolinas y diversas zonas deprimidas), la mayor humedad condiciona una meteorización más intensa, y la evacuación normalmente se produce a través de planos de estratificación bajo los rellenos de bloques; el agua subterránea circula en forma laminar, el terreno tiende a hundirse por aplastamiento, y la surgencia se produce en forma de láminas dispersas. Los puntos de surgencia observados prueban que existe cierto grado de infiltración y circulación de agua, pero parecen faltar las condiciones adecuadas para concentrar y canalizar estas filtraciones, con lo cual no llega a producirse la tubificación (= piping) y la formación de conductos y drenes que caracterizan al karst.

La circulación de agua intergranular en la arenisca facilita así la creación de vacíos pero a la vez, de modo paradójico, evoluciona impidiendo su karstificación. Las condiciones mecánicas de la roca también juegan un doble papel, contradictorio: la creación de fracturas por descompresión facilita la infiltración, pero los colapsos tienden a destruir los conductos que llegan a formarse. Las cavidades hasta ahora encontradas son comparativamente muy superficiales. La disolución intergranular del cemento hace que en la roca arenizada se formen cavidades y diversas geoformas, pero en la medida en que el proceso se extiende a volúmenes mayores de roca, las cavidades son destruidas. El resultado es un retroceso de los escarpes y un progresivo rebajamiento de superficie. Las cavidades formadas persisten cierto tiempo, pero sin llegar a constituir un karst con un sistema de drenaje subterráneo bien desarrollado. No obstante, localmente, parece posible que futuras prospecciones puedan poner al descubierto ejemplos de cuevas más extensas que las hasta ahora conocidas.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las características que presenta el pseudokarst en arenisca del flysch Eoceno resultan singulares, comprendiendo cavidades y geoformas muy originales. Los procesos que intervienen en su génesis (disolución intergranular y arenización de la roca) son ampliamente equivalentes a aquellos involucrados en la formación del karst en cuarcita (URBANI, 1986; GALAN, 1991).

La disolución intergranular del cemento carbonático es un fenómeno general en los afloramientos de arenisca compacta de la región. La disolución de la sílice también ha sido constatada, pero es un proceso menos importante en términos cuantitativos. De igual modo, la alteración de feldespatos y micas, incluidos en cantidades minoritarias, es más o menos completa, pero poco relevante cuantitativamente.

Sobre las formas geoformas menores (alveolos, boxworks, etc.), la velocidad e intensidad de la meteorización depende de atributos texturales (tamaño de grano, selección granulométrica, porosidad, proporción de cemento), que resultan modificados por los equilibrios geoquímicos y dinámicos que ocurren a pequeña escala en el acuífero intergranular. No obstante, en las formas mayores del relieve (cavidades, depresiones, escarpes), otros factores se suman a los anteriores y revisten gran importancia, como los debidos al comportamiento mecánico de las rocas, grandes rasgos estructurales, y exposición a las precipitaciones y a la acción de las aguas subterráneas. La posición de las paredes rocosas en relación a la incidencia de la radiación solar, lluvia y viento, así como su posición topográfica y la edad de su exposición, parecen ser factores determinantes en la evolución de conjunto y en la génesis del cavernamiento.

Hemos expuesto una hipótesis genética o modelo general, pero probablemente no existe un modelo simple que pueda dar cuenta de todos los detalles y explicar la gran diversidad de geoformas. Para ello está faltando investigación adicional, con mayor

número de análisis de muestras, con técnicas analíticas más afinadas (petrografía de secciones finas, imágenes SEM, análisis DRX, etc.), y sobre todo comparando las características de la roca en distintas geoformas y en la roca-caja adyacente.

Desde un punto de vista hidrogeológico, las areniscas del flysch Eoceno conforman un pseudokarst que se comporta en parte como un acuífero estructural y localmente como un acuífero kárstico. Sus características deben ser tenidas en cuenta si se planean captaciones y aprovechamientos de agua subterránea, tanto por la existencia de grandes diferencias en las posibilidades de producción de agua, como por el riesgo de fenómenos de colapso. La dinámica de las aguas subterráneas en este pseudokarst permanece hasta ahora poco conocida, pero puede resultar de interés por varias razones: un incremento en la demanda de agua para usos domésticos e industriales; riesgos de contaminación debidos a residuos y plaguicidas; manejo de sitios con recursos naturales y paisajísticos, de gran interés científico.

Estos últimos están representados por relieves, cavidades y geoformas de características remarcables (algunas de ellas son formas originales y típicas de esta litología, otras constituyen los mejores ejemplos conocidos en su tipo a nivel mundial), así como por la ocurrencia de una fauna hipógea singular, biotopos crípticos rocosos y litorales con una peculiar flora y fauna asociada, y existencia de enclaves de potencial interés como sitios arqueológicos.

De modo general concluimos que la disolución intergranular es el proceso básico que controla la formación de cavidades en esta litología. El funcionamiento a pequeña escala del acuífero intergranular, unido a la ocurrencia de fases de humectación y desecación, producen la evacuación de las fracciones disueltas y la redistribución del material remanente, recementado o no disuelto. De esta forma se generan áreas duras y blandas, que serán trabajadas diferencialmente por las aguas de infiltración. El resultado de todo ello es la diversidad de cavidades y formas pseudokársticas que presenta la arenisca del flysch Eoceno.

BIBLIOGRAFIA

BAKALOWICZ, M. 1982. La genése de l´acuifére karstique vue par un geochimiste. Karst Larra 82; Publ. Serv. Geol. Dip. Navarra: 159-174.

CAMPOS, J. 1979. Estudio geológico del Pirineo vasco al W del río Bidasoa. Munibe, S.C.Aranzadi, 31(1-2): 3-139.

GALAN, C. 1991. Disolución y génesis del karst en rocas silíceas y rocas carbonáticas: un estudio comparado. Munibe (Ciencias Naturales), Soc. Cienc. Aranzadi, 43: 43-72.

GALAN, C. 2001. Primeros datos sobre el Medio Subterráneo Superficial y otros habitats subterráneos transicionales en el País Vasco. Munibe (Ciencias Naturales), Soc. Cienc. Aranzadi, 51: 67-78.

GALAN, C.; J. RIVAS & M. NIETO. 2007a. Pseudokarst dans les grès du flysch littoral Éocène, Gipuzkoa, Pays Basque Espagnol. Spelunca, FFS, 109: 12 pp (en prensa). + Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 44 pp.

GALAN, C.; J. RIVAS & M. NIETO. 2007b. Notas suplementarias sobre formas pseudokársticas en arenisca del flysch Eoceno, Gipuzkoa. Lapiaz, 32: 20 pp (en prensa). + Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 20 pp.

GALAN, C.; J. RIVAS & M. NIETO. 2008a. Geoformas cordadas en arenisca del flysch costero Eoceno, Gipuzkoa. Pag. web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 28 pp.

GALAN, C.; J. RIVAS; M. NIETO & I. HERRAIZ. 2008b. Cañones, acantilados, escarpes y su relación con cavidades en arenisca (flysch costero Eoceno, Gipuzkoa). Pag. web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 28 pp.

GALAN, C.; J. RIVAS & M. NIETO. 2008c. Estructuras de corriente en turbiditas del flysch Eoceno. Pseudokarst en arenisca, Gipuzkoa (País Vasco). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 32 pp.

GALAN, C. & J. LAGARDE. 1988. Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quarzites du Roraima. Kartologia, 11-12: 49-60.

GALAN, C. & F. HERRERA. 2005. Le sistème Roraima Sud au Venezuela: La plus grande cavité du monde creusée dans les quartzites. Spelunca, FFS, nº 99 - Septembre 2005: 17-22.

GALAN, C. & F. HERRERA. 2006. El sistema Roraima Sur, Venezuela, y la formación del karst en cuarcitas. Bol. SEDECK, 6: 18-27.

GEZE, B. 1973. Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie. Ann. Spéléol., 28(1): 1-20.

HALLIDAY, W. R. 1960. Pseudokarst in the United States. Nat. Spel. Soc. Bull., 22: 109-113.

HOLMES, A. 1965. Principles of physical geology. Nelson Ed., London & Edinburgh, 1288 pp.

MAIRE, R. 1980. Éléments de Karstologie physique. Spelunca, FFS, Special nº 3, 1980 - Nº 1 supplément, 56 pp.

MARTINI, I. P. 1978. Tafoni weathering, with examples from Tuscany, Italy. Zeitschrift für Geomorphologie, 22(1): 44-67.

MARTINI, J. 1982. Karst in Black Reef and Wolkberg Group quartzite of eastern Transvaal escarpment, South Africa. Bol. Soc. Venezol. Espeleol., 10(19) : 99-114.

MARTINI, J. 1987. Les phénoménes karstiques des quarzites d´Afrique du Sud. Kartologia, 9 : 45-52.

MONROE, W. H. 1970. A glossary of karst Terminology. U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1999-K, 26 pp.

MUSTOE, G. E. 1982. The origin of honeycomb weathering. Geological Society of America, 93:108-115.

TWIDALE, C. 1982. Granite landforms. Amsterdam. Elsevier: 372 pp.

URBANI, F. 1981. Karst development in siliceous rocks, Venezuelan Guiana Shield. Proc. 8th Inter. Congr. Speol., 2: 548.

URBANI, F. 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. Interciencia, 11(6): 298-300.

URBANI, F. & E. SZCZERBAN. 1975. Formas pseudocársicas en granito rapakivi Precámbrico, Territorio Federal Amazonas. Bol. Soc. Venezol. Espeleol., 6(12): 57-70.