

**NOTAS SUPLEMENTARIAS SOBRE PSEUDOKARST EN ARENISCA DEL FLYSCH EOCENO, GIPUZKOA.**

Supplementary notes about Pseudokarst in sandstone of the Eocene flysch, Gipuzkoa.



**Carlos GALAN; José RIVAS & Marian NIETO.**

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

E-mail: [cegalham@yahoo.es](mailto:cegalham@yahoo.es)

(Octubre 2007)

# NOTAS SUPLEMENTARIAS SOBRE PSEUDOKARST EN ARENISCA DEL FLYSCH EOCENO, GIPUZKOA.

Supplementary notes about Pseudokarst in sandstone of the Eocene flysch, Gipuzkoa.

**Carlos GALAN; José RIVAS & Marian NIETO.**

Sociedad de Ciencias Aranzadi. Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.

E-mail: [cegalham@yahoo.es](mailto:cegalham@yahoo.es)

(Octubre 2007)

## RESUMEN

Se presentan descripciones y datos analíticos sobre formas pseudokársticas desarrolladas en arenisca de edad Eoceno, localizadas en el flysch litoral de Gipuzkoa (País Vasco). Estos datos son un suplemento de un trabajo anterior. En la zona se encuentran sistemas de pequeñas cuevas y abrigos, con numerosas geoformas de características remarcables. Se discute el proceso de origen de las formas pseudokársticas.

*Palabras clave:* Espeleología, pseudokarst, arenisca, geomorfología, cuevas, abrigos y formas de superficie.

## ABSTRACT

We present descriptions and analytical data of pseudokarst forms developed in sandstone of Eocene age, located in the flysch of Gipuzkoa Coast (Basque Country). These data are a supplement of a former work. In the region there are several rock shelters and cave systems with numerous geoforms of remarkable traits. We discuss the origin process of the pseudokarst forms.

*Key words:* Speleology, pseudokarst, sandstone, geomorphology, caves, shelters and superficial forms.

## INTRODUCCION

En la costa de Gipuzkoa se desarrolla un notable conjunto de formas pseudokársticas, en arenisca del flysch litoral Eoceno (Formación Jaizkibel). Una extensa descripción del mismo es aportada en un trabajo reciente (GALAN et al., 2007). Las formas pseudokársticas incluyen sistemas de pequeñas cuevas de distinto tipo, abrigos, grutas, oquedades y una diversidad de macro y microformas, generadas básicamente por procesos de disolución intergranular de la arenisca y meteorización química. Otros fenómenos, como procesos clásticos, erosión marina, pluvial y eólica, también intervienen en el modelado resultante.

En esta nota queremos incidir en explicar la génesis y evolución de las formas pseudokársticas observadas. Especialmente las características que pueden atribuirse a la estructura primaria de la arenisca, aquellas otras debidas al avance de la disolución intergranular y progresiva meteorización de la roca, y las relaciones entre ambas. La nota incluye datos cuantitativos de algunos análisis efectuados por vía húmeda en muestras de roca, y una interpretación de los mismos. Adicionalmente aprovechamos para incluir nuevas fotografías a color, las cuales ilustran mejor que mil palabras, la singularidad y originalidad de muchas de las formas pseudokársticas encontradas (y de los relieves que las contienen). Estas comprenden geoformas tipo microlapiaz litoral, estructuras en disco y pilares, laminaciones, nódulos y concavidades, muy diversos tipos de alveolos, formas en panal de abejas, formas tipo tafoni, box-works, oquedades, abrigos, grutas y cuevas.

Cabe destacar que el flysch Eoceno (Formación Jaizkibel) está formado por capas duras de arenisca carbonática, con intercalaciones de niveles delgados de lutitas. La secuencia de sedimentos turbidíticos tiene un espesor total de más de 1.000 m. Acumulaciones de este tipo de tal espesor son raros a nivel mundial. De igual modo, aunque han sido descritos diversos tipos de alveolos y tafoni en arenisca y otros tipos de roca (granito, basalto, cuarcita, etc.), los ejemplos aquí presentados resultan singulares, constituyendo formas originales y típicas de esta litología. Además, los procesos de disolución intergranular y arenización de la roca son ampliamente equivalentes a aquellos involucrados en la formación del karst en cuarcitas.

## CONTEXTO GEOGRAFICO Y GEOLOGICO

El flysch costero Eoceno ha sido denominado Formación Jaizkibel y ha sido estudiado y descrito, entre otros, por: JEREZ et al. (1971), CAMPOS (1979), VAN VLIET (1982) y ROSELL (1988). La Formación Jaizkibel forma un suave arco de concavidad al N que se extiende 40 km entre Hondarribia y Zarauz. Las zonas de pseudokarst que estudiamos en este trabajo comprenden los tramos centrales de los montes Jaizkibel, Ulía e Igueldo, de estructura monoclinial y buzamiento bajo a medio, de 30° N como promedio. Dentro de estas zonas, los sectores con mayor número de cavidades y geoformas se localizan en torno a relieves prominentes, sobre éstos y en escarpes verticales de sus flancos y de acantilados costeros.

La Formación Jaizkibel 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. En la zona de estudio de este trabajo los estratos individuales de arenisca tienen 2 a 8 m de potencia. Los sectores con mayor número de cavidades y geoformas se presentan en estratos de la parte superior de la secuencia Eocena, donde los estratos de arenisca carbonática alcanzan mayor espesor y reposan prácticamente unos sobre otros, faltando o siendo muy escasos y delgados los niveles de lutitas. Así que básicamente se trata de un pseudokarst en arenisca.

Litológicamente son areniscas cuarzosas, de variados colores claros (blancas, amarillas, anaranjadas, rosadas y ocres), y de matriz carbonática. Su contrastante coloración es apreciada en cortes frescos y en el interior de abrigos, cavidades y paredes en proceso de arenización, ya que en superficie la roca es gris. Precisamente, esta coloración monótona de tonos grises (al igual que la presencia de pequeños alveolos y nódulos) es conspicua en gran parte de la formación y sobre todo en las zonas costeras de fácil acceso, por lo que la existencia de formas pseudokársticas ha pasado desapercibida. Los mejores ejemplos de pseudokarst se encuentran en zonas de difícil acceso, donde los sistemas de cavidades y abrigos, con notables geoformas, a veces quedan colgados en paredes verticales y laderas abruptas. En el interior de las cavidades, en activo proceso de arenización, es donde mejor se aprecian las remarcables características de este pseudokarst (GALAN et al, 2007).

Estas areniscas están formadas por un entramado de granos de cuarzo bien redondeados (o ligeramente angulosos), que pueden constituir hasta el 90% de la roca (siempre más del 80%), cantidades minoritarias de feldespatos y micas, y matriz o cemento carbonático (JEREZ et al., 1971; CAMPOS, 1979; GALAN, 2001; GALAN et al., 2007).

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. La erosión de los estratos con nódulos esféricos genera concavidades posteriormente suavizadas y retocadas por erosión eólica e hídrica. 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 formación, sino en estos relieves prominentes de la parte superior de la serie (de finales del Eoceno inferior). Precisamente, han resultado en relieve positivo porque la erosión normal ha modelado y rebajado diferencialmente los tramos menos compactos (o más fácilmente erosionables) adyacentes. La erosión normal actual y los procesos de descompresión mecánica generan escarpes verticales y flancos abruptos, en activo proceso de erosión y recorte, con desprendimientos de bloques clásticos y retroceso de las pendientes.

## DISOLUCIÓN Y PSEUDOKARST EN ARENISCA

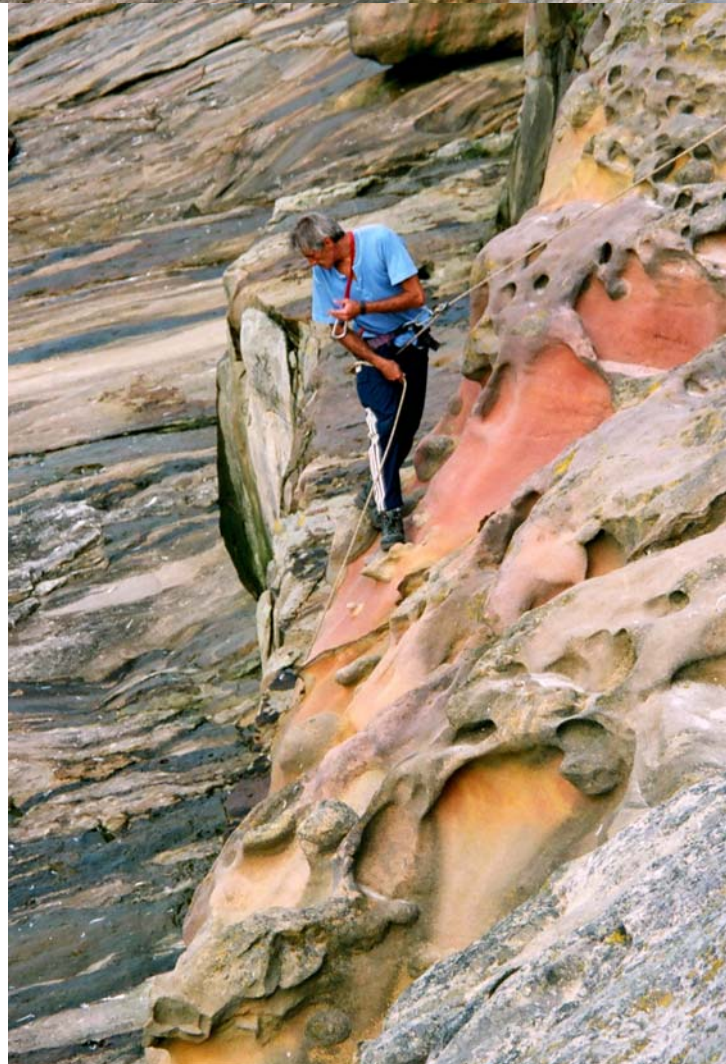
Clásicamente se entendía que los *fenómenos kársticos* eran aquellos debidos a la disolución de rocas geológicamente solubles (como caliza y yeso), mientras que los *fenómenos pseudokársticos* eran producto de acciones físicas y químicas (desintegración termoclástica, hidrólisis de feldespatos, etc.) 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.

Nuestro caso se asemeja en varios aspectos al karst en cuarcita de países como Venezuela, Brasil o Sudáfrica (URBANI, 1981, 1986; GALAN & LAGARDE, 1988; GALAN & HERRERA, 2005, 2006). Tanto las areniscas de la Formación Jaizkibel como las cuarcitas del Grupo Roraima están compuestas mayoritariamente (más del 80% hasta el 96%) por granos de cuarzo, residiendo la principal diferencia en que la matriz o cemento intergranular es carbonático en el primer caso y silíceo en el segundo. La disolución puede verse facilitada en las areniscas, 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 de la Formación Jaizkibel existen pequeñas cuevas y abrigos, numerosas macro y microformas de superficie, pequeñas circulaciones 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 utilizamos el término pseudokarst. No obstante, somos de la opinión de que algunas geoformas resultan notables.



**Escarpes verticales de arenisca con numerosos abrigos, grutas y pequeñas cuevas.** Algunas cavidades están colgadas, a distintas alturas, sobre los flancos verticales, y se requiere técnicas de escalada o espeleo para acceder a ellos (foto superior). En la foto inferior puede apreciarse que algunas diaclasas y fracturas están rellenas de vetas con alto contenido en hierro y sílice secundaria. Muchas cavidades y abrigos se localizan en la montaña, a cierta distancia y altitud con respecto al nivel del mar.



**Escarpes verticales y extraplomados en la zona litoral.** Formados por procesos clásticos mecánicos (descompresión de la roca) al progresar la erosión marina. El descenso con técnicas de espeleo permite alcanzar enclaves de muy difícil acceso. Nótese las numerosas láminas de agua que emergen de los planos de estratificación sobre la laja costera.



**Laminación disturbada debida a corrientes de turbidez.** Forma finos dibujos sinuosos en la estructura primaria de la arenisca. En la foto superior la parte blanca de la arenisca tiene un alto contenido arcilloso. Se aprecia también la formación de alveolos en un reborde del abrigo. En la foto inferior, un bloque tafonizado de arenisca rosada. Nótese el depósito de arena suelta sobre una repisa y la existencia, al lado, de cuevas de recubrimiento, formadas por los espacios libres entre el amontonamiento de bloques.



**Detalle de laminaciones y geformas alveolares.** Las de la imagen superior muestran diversas estructuras debidas a las corrientes de turbidez, de distinto colorido, incluyendo formas globulares. En la imagen inferior, los alveolos menores evolucionan hacia formas tipo box-work, de tabiques delgados y diseño poligonal.

Los procesos que generan estas cavidades y formas asociadas en la arenisca incluyen meteorización química (disolución, alteración de los minerales, procesos bioquímicos), erosión mecánica o corrosión, procesos clásticos, erosión marina, erosión eólica, y combinaciones de varios de ellos actuando simultáneamente (GALAN et al, 2007). En este conjunto de procesos la meteorización química resulta ser el factor fundamental. La meteorización disuelve, altera y disgrega la roca, tornándola friable e incoherente, y facilita la erosión y transporte posterior 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 de la matriz carbonática procede químicamente como en las calizas, por acción de las aguas meteóricas cargadas de CO<sub>2</sub> y ácidos del suelo. Pero además de actuar a través o a partir de discontinuidades de la roca (diaclasas y planos de estratificación), lo interesante es que puede progresar intergranularmente. De este modo es disuelto el cemento carbonático. También puede ser disuelto cierto porcentaje de sílice. 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 de este modo disolver lentamente parte de los granos de cuarzo (MARTINI, 1982). De este modo el cuarzo puede también ser disuelto y evacuado en cierto porcentaje, además del cemento carbonático. Al aumentar la porosidad efectiva, entre los granos y en el cemento, los feldspatos y micas (incluidos en la arenisca en cantidades minoritarias) quedan también expuestos a una alteración relativamente rápida, produciendo minerales de la arcilla, fácilmente removibles. Así, al progresar la disolución intergranular y la alteración de los minerales, 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, por avance de la disolución intergranular, permite que entonces puedan ser removidos volúmenes mayores de roca.

## **DATOS Y OBSERVACIONES DE CAMPO**

La disolución intergranular es responsable de la formación de abrigos, grutas y cuevas, y, dentro de éstas, de la formación de geoformas alveolares, desde pequeños alveolos (clásicamente descritos como tafoni y atribuidos a erosión eólica), hasta otros más grandes, con formas coraloides, otras que recuerdan la estructura de los panales de abejas, y grandes hojaldres o box-works; éstos últimos presentan tabiques muy delgados, de diseño poligonal, separando alveolos profundos y grandes (hay buenos ejemplos de box-works de 0,8 m de profundidad y 0,2 m de diámetro de celdas, separados por tabiques milimétricos). Existen también formas cordadas (en forma de cordones entrelazados) casi totalmente separadas de la pared, y que se han formado al perforarse los tabiques entre celdas. En todos los casos se trata de geoformas de la roca-caja y no de espeleotemas. Adicionalmente, la arenización en el interior de las cavidades pone al descubierto delicados dibujos y diseños de las estructuras de corriente, nódulos y concavidades de distinto tipo, que han sido meteorizados diferencialmente. Estos efectos corresponden a características litológicas y texturales de las turbiditas, por lo que se trata de rasgos (al igual que la coloración de las areniscas) adquiridos durante su diagénesis. Patrones complejos resultan también de la interacción entre el relieve interno de los abrigos y la geometría de las geoformas, con llamativos efectos estéticos. Formas similares a las de los abrigos se presentan también, en menor grado, en paredes externas (expuestas a la intemperie) en proceso de arenización, pero generalmente ocurren en sitios algo protegidos por extraplomos o rebordes protectores. Algunos ejemplos en paredes verticales sugieren que en algunos casos se trata de abrigos poco profundos que han perdido recientemente su cobertura protectora, por avance de la erosión de superficie. En todo caso, siempre presentan superficies al menos levemente arenizadas, en las que los granos de cuarzo se desprenden por fricción con cierta facilidad.

El residuo de la arenización de la roca es arena fina, que se deposita en los suelos y repisas de las cavidades y geoformas. Estas arenas pueden ser removidas por gravedad y por acción eólica. Esta última puede desgastar por deflación las zonas de roca más blandas, generando agujeros, tubos, ventanas, arcos y puentes de roca. Pero en todos los casos actuando sobre roca que ya ha sido arenizada y es poco compacta. También el agua de lluvia, y las salpicaduras del oleaje en la zona intertidal, se llevan los materiales disgregados.

Ha sido propuesto un modelo teórico general para explicar la formación de cavidades y geoformas en su interior (GALAN et al., 2007). 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 se evapora de la roca, y parte del carbonato disuelto es conducido hacia la superficie, donde forma 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 las formas alveolares de los tafoni (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 creemos que en las fases más tempranas del proceso, o en las zonas internas de la roca donde las circulaciones sean más lentas, es muy probable que la sílice de los granos de cuarzo pueda ser disuelta, en pequeñas cantidades. Igualmente es probable que se produzca alteración o meteorización de los feldespatos y micas contenidos en la matriz. Esta meteorización se produce con facilidad en ambiente húmedo cargado de CO<sub>2</sub> y genera carbonatos y silicatos aluminicos 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<sub>2</sub> 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, puede deberse así a la existencia de silicificaciones y enriquecimientos en hierro a lo largo de fracturas, las cuales endurecen esa parte de la roca, haciéndola más resistente a la arenización posterior. De modo similar, la disolución del carbonato, durante las fases de desecación, permitirá la retracción y formación de mallas de material recementado o no-disuelto; estas mallas serán la base para que progrese la creación de tabiques entre celdas.

Para tratar de entender mejor estos aspectos tomamos muestras de roca de dos tipos, con objeto de compararlas: uno de ellos es una arenisca oscura presente en vetas y láminas resistentes; el otro es una arenisca clara, normal (no arenizada), adyacente a la primera. El análisis químico por vía húmeda da los siguientes resultados:

Muestra	PF	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Suma
Arenisca clara	1,13	89,02	2,93	1,35	0,2	0,25	94,88
Arenisca oscura	4,52	59,72	10,66	21,47	0,19	0,11	96,67

Los datos obtenidos constatan una diferencia muy significativa en el contenido en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> así como, entre otros, en SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; y diferencia apreciable en la pérdida al fuego (PF), no proveniente de caliza (ver CaO), ni de la humedad, pues ya está descontada esta última.

Cabe señalar que en este tipo de análisis por vía húmeda, la muestra de roca es molida finamente, disuelta en ácido clorhídrico, y secada en caliente. La PF corresponde a una submuestra calcinada a más de 1.000 °C, hasta peso constante. La disolución en ácido elimina el cemento carbonático, por lo que los porcentajes en peso obtenidos de la muestra seca corresponden a los granos de cuarzo y otros minerales insolubles que quedan después de calentar (sílice secundaria y subproductos del feldespato, mica, y minerales de hierro). La PF indica la cantidad perdida al calcinar (correspondiente a materia orgánica y agua molecular contenida en las fracciones arcillosas).

La interpretación de estos resultados muestra que en las vetas (arenisca oscura) el total de cuarzo es menor, y poseen una alta cantidad de hierro y aluminio. Sin considerar otros detalles, resulta claro que los feldespatos y micas son alterados, parte de la sílice es disuelta y evacuada. Así, podemos concluir, de modo comparado, que la disolución intergranular de la arenisca puede disolver el cemento carbonático, parte de la sílice de los granos de cuarzo, y casi totalmente los feldespatos y micas contenidos en la arenisca en cantidades minoritarias.

No obstante, haría falta análisis más detallados para comparar, en las formas alveolares, las diferencias entre las partes más resistentes que forman los tabiques y las partes más blandas que forman las celdas.

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 formas cavidades y geofomas 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. Y es probable que las cavidades persistan por más tiempo precisamente en las rocas más duras y compactas.



**Lajas litorales con diversas geofomas.** En la foto superior puede apreciarse la formación de fracturas mecánicas por descompresión de los estratos de roca, con el consiguiente desprendimiento de bloques y retroceso de los escarpes. En la foto inferior, microlapiaz litoral debido a las salpicaduras del oleaje y estructuras nodulares en forma de disco, que han quedado en relieve positivo al progresar la meteorización superficial y la erosión marina.



**Lajas costeras con estructuras en disco y abrigos.** Además de nódulos semiesféricos, las lajas costeras presentan zonas con nódulos discoidales, estructuras en forma de pilares o discos apilados, microlapiaz litoral, y abrigos de erosión marina. Estas formas son generadas al desgastarse la roca por disolución superficial debida a la acción del agua de mar pero también de la lluvia, en la zona de alcance del oleaje. Algunos abrigos intersectan diaclasas y dan origen a sistemas de pequeñas cuevas, de desarrollo decamétrico.



**Cueva hidrológicamente activa formada por disolución.** Esta cavidad, de 70 m de desarrollo, tiene una génesis similar a las del karst clásico (en caliza) o a cavidades en cuarcita. La cavidad es el sumidero de un pequeño río. La galería subterránea se desarrolla a expensas de la estratificación. Nótese la presencia de depósitos de minerales secundarios (de espesor milimétrico) sobre paredes y techos. Aunque no han sido estudiados, probablemente incluyen calcita y otros minerales. La atmósfera húmeda de la galería contrasta con la atmósfera seca de los abrigos superficiales en escarpes, donde la roca arenizada es removida y disgregada en arena con mayor facilidad, impidiendo la formación de espeleotemas.



**Zona de entrada de cueva de disolución de 70 m de desarrollo.** La cavidad se localiza en una hondonada de un cauce superficial, y captura la corriente epígea canalizándola subterráneamente, de modo similar al karst clásico en caliza. La cueva-sumidero está situada a una altitud de 60 m snm.

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 puede penetrar también 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 y descohesionando la roca antes compacta, hasta dejar los granos de cuarzo casi sueltos. Este parece ser el proceso primario. En el crecimiento volumétrico posterior de las cavidades pueden influir muchos otros factores (anisotropía de la roca, diferencias litológicas y texturales, haloclastia, etc.). Pero el proceso básico es el mismo y controla las diversas formas generadas, desde pequeños alveolos hasta grandes abrigos, grutas y cuevas.

Las excepciones hasta ahora encontradas corresponden a cuevas individuales y pequeños sistemas de cuevas y mesocavernas, formadas por disolución y por erosión marina, a expensas de redes de diaclasas y planos de estratificación (GALAN, 2001; GALAN et al., 2007). Tanto en Igueldo como en Jaizkibel hemos encontrado redes de este tipo. Los sistemas de pequeñas cuevas, de 10-20 m de desarrollo, se encuentran en la línea de costa, donde la diferencia de altura de las mareas y el oleaje contribuyen a la acción erosiva. Algunas de ellas poseen pequeñas galerías y mesocavernas en zona oscura, por encima del nivel de pleamar. Algunas galerías son recorridas por hilos de agua y flujos laminares que amplían los conductos y redondean el perfil de las secciones.

La mayor cavidad encontrada, de 70 m de desarrollo, es una cueva-sumidero, cuya morfología puede apreciarse en las fotografías anexas a esta nota. Es una cueva hidrológicamente activa, recorrida por un pequeño río subterráneo y está situada en un valle a 60 m de altitud. Consta de un abrigo inicial de techo bajo y luego de una galería única en oscuridad total que prosigue hasta una obstrucción por colapso de bloques. La cavidad se asemeja a una típica cueva en caliza, formada por disolución, a expensas de un plano de estratificación. Cabe señalar que las bóvedas y paredes de esta cavidad presentan recubrimientos de espesor milimétrico de minerales secundarios (espeleotemas), incluyendo probablemente calcita. La atmósfera húmeda de la galería contrasta con la atmósfera seca de los abrigos y grutas superficiales. En estos últimos la remoción de la roca arenizada parece impedir que ocurra la formación de espeleotemas.

En la base de escarpes verticales y a través de los planos de estratificación manan numerosos flujos laminares de agua, que prueban que existe cierto grado de infiltración y circulación de agua, pero parecen faltar las condiciones adecuadas para concentrar y canalizar estas filtraciones dispersas, con lo cual no llega a producirse la tubificación (= piping) y la formación de conductos y drenes que caracterizan al karst.

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.

## CONCLUSIONES

Las características que presenta el pseudokarst en arenisca de la Formación Jaizkibel resultan singulares, comprendiendo 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).

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. No son conocidos en detalle los aspectos geoquímicos y dinámicos que intervienen en la desagregación diferencial de la roca. Para ello haría falta investigación adicional, con mayor número de análisis de muestras, con técnicas analíticas más afinadas (petrografía de secciones finas, etc.), y sobre todo comparando las características de la roca en distintas geoformas y en la roca-caja adyacente.

De modo general concluimos que la disolución intergranular afecta mayoritariamente a la matriz o cemento carbonático, y minoritariamente incluye también la alteración de feldespatos y micas, la movillización de hierro y la disolución parcial de las superficies de los granos individuales de cuarzo. La alternancia 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 formas pseudokársticas que presenta la arenisca del flysch costero Eoceno.



**Geoformas en abrigos y grutas superficiales.** Arriba: bloque tafonizado y vaciado, con alveolos tipo box-work. Abajo: abrigo superficial en arenisca rosada, con estructuras de corriente, box-works, concavidades y nódulos en relieve positivo, algunos de ellos también parcialmente meteorizados.

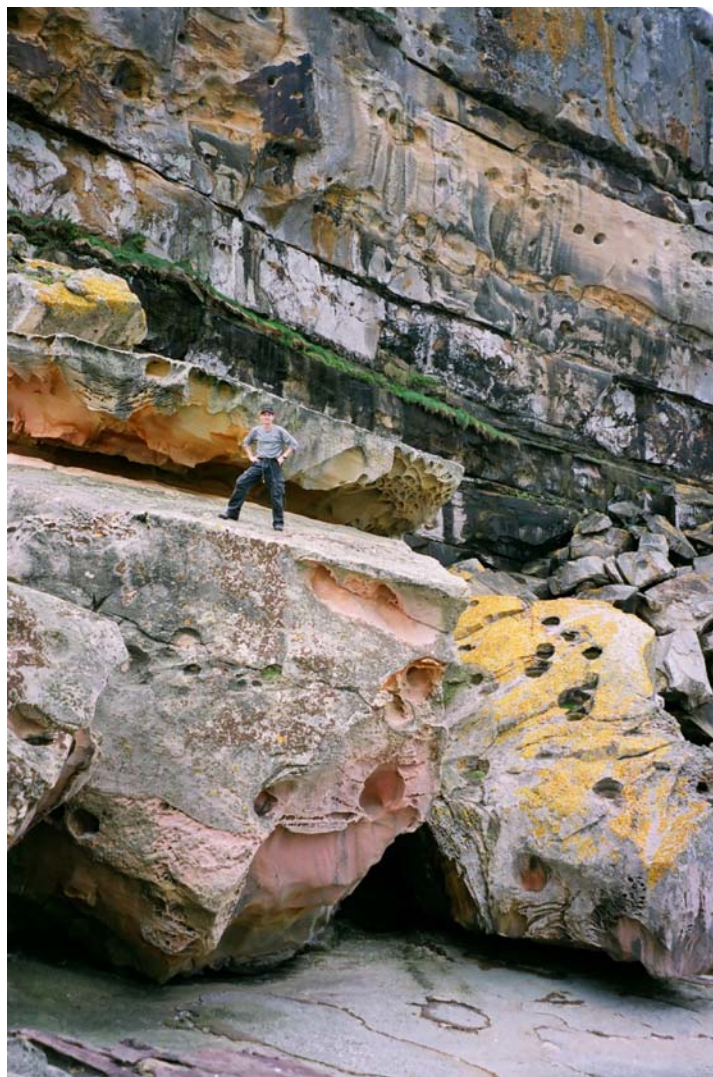


**Abrigos y nichos o pequeñas grutas con numerosas geoformas.** En la foto superior, alveolos en forma de hojaldres (= box-work) o celdas tipo panal de abejas. Se aprecian dos vetas delgadas y sinuosas que atraviesan la pared, con alto contenido en hierro y sílice secundaria. En la parte más externa y más expuesta a la intemperie se presentan numerosos pequeños alveolos en roca compacta. En la foto inferior, laminación ondulada y ventanas, tubos y puentes de roca. El residuo de la meteorización en el suelo es un relleno de arena suelta. Los abrigo están situados a cierta distancia y altitud con respecto al nivel del mar.





**Escarpe vertical y bloques de colapso con numerosas geoformas.** Puede apreciarse en primer lugar el espesor de los estratos individuales. La pared del fondo supera los 40 m de altura y es una secuencia ininterrumpida de gruesos estratos de arenisca, de 2 a más de 8 m de potencia, los cuales descansan prácticamente unos sobre otros, con escasos y muy delgados niveles intercalados de lutitas. En las zonas arenizadas de la pared y de los bloques desprendidos se aprecia la coloración de las areniscas, las cuales poseen oquedades producto del vaciado de nódulos esféricos. Los bloques están tafonizados, con numerosos abrigos, oquedades y cuevas de recubrimiento. En la imagen inferior, en su parte derecha, se aprecia un gran abrigo formado por colapso. Las manchas amarillas (y otras marrones) son líquenes. Otros colores superficiales son debidos a films de microorganismos.



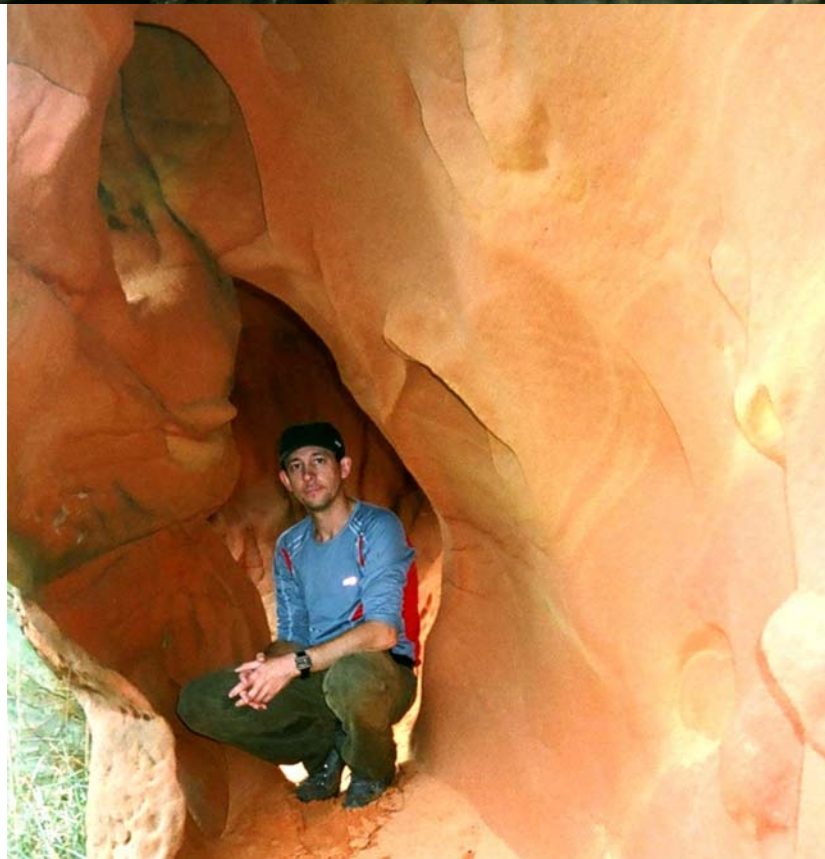
**Acantilados marinos con grandes escarpes verticales.** Es la misma zona de las fotos anteriores. Nótese la proximidad al mar, los grandes bloques desprendidos producto de la fractura de los estratos. En la imagen superior pueden observarse dos grandes abrigos, y en la inferior, espacios entre bloques y un estrato resistente los cuales forman cuevas de recubrimiento. La superficie de la arenisca, de tonos grises, es relativamente compacta y sólida, mientras que los bloques tafonizados poseen abrigos con paredes arenizadas, en los cuales los granos de cuarzo se disgregan con facilidad, y poseen numerosas geoformas alveolares y tipo box-work.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de todos los que nos acompañaron en las salidas de campo y en particular la ayuda prestada por Hugo Pérez Leunda en la prospección de varios lugares de difícil acceso. Agradecemos a Carlos Oyarzabal y al personal de laboratorio de Cementos Rezola (Italcementi Group) por los análisis químicos por vía húmeda de varias muestras de arenisca y colaboración suplementaria. A Franco Urbani (Sociedad Venezolana de Espeleología), geólogo y espeleólogo, reconocido experto y pionero en la investigación del karst en cuarcita, por sus observaciones y útiles sugerencias. A Daniel Adrián Decon, por las múltiples salidas compartidas desde hace años al litoral guipuzcoano y por habernos indicado la importancia e interés de diversos enclaves prospectados durante el presente trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

- BAKALOWICZ, M. 1982. La genése de l'acuífère 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. LAGARDE. 1988. Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quartzites du Roraima. Kartologia, 11-12: 49-60.
- GALAN, C. & F. HERRERA. 2005. Le système 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.
- GALAN, C.; J. RIVAS & M. NIETO. 2007. Pseudokarst en arenisca del flysch costero Eoceno, Gipuzkoa. Pag. web SCA, Dpto. Espeleología, Apdo. Artículos de Consulta: <http://www.aranzadi-sciences.org>. Archivo PDF, 45 pp.
- GEZE, B. 1973. Lexique des termes français de spéléologie physique et de Karstologie. Ann. Spéol., 28(1) : 1-20.
- HALLIDAY, W. R. 1960. Pseudokarst in the United States. Nat. Speleol. Soc. Bull., 22: 109-113.
- HOLMES, A. 1965. Principles of physical geology. Nelson Ed., London & Edinburgh, 1288 pp.
- JEREZ MIR, L.; ESNAOLA, J. & V. RUBIO. 1971. Estudio Geológico de la Provincia de Guipúzcoa. Mem. IGME (Inst. Geol. y Min. España), Tomo 79, Madrid, 130 pp + Fotograf.
- 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.
- 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.
- ROSELL, J. 1988. Ensayo de síntesis del Eoceno sudpirenaico: El fenómeno turbidítico. Rev. Soc. Geol. España, Márgenes continentales de la Península Ibérica, Vol. 1 (3-4): 357-364.
- 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.
- VAN VLIET, A. 1982. Submarine fans and associated deposits in the Lower Tertiary of Guipúzcoa (Northern Spain). Thesis Doct., Univ. Utrecht, Netherlands, 180 pp.



**Pseudokarst en arenisca del flysch costero Eoceno, Gipuzkoa.** Un sorprendente campo de estudio, que continuamos prospectando y que aún presenta incógnitas por dilucidar.