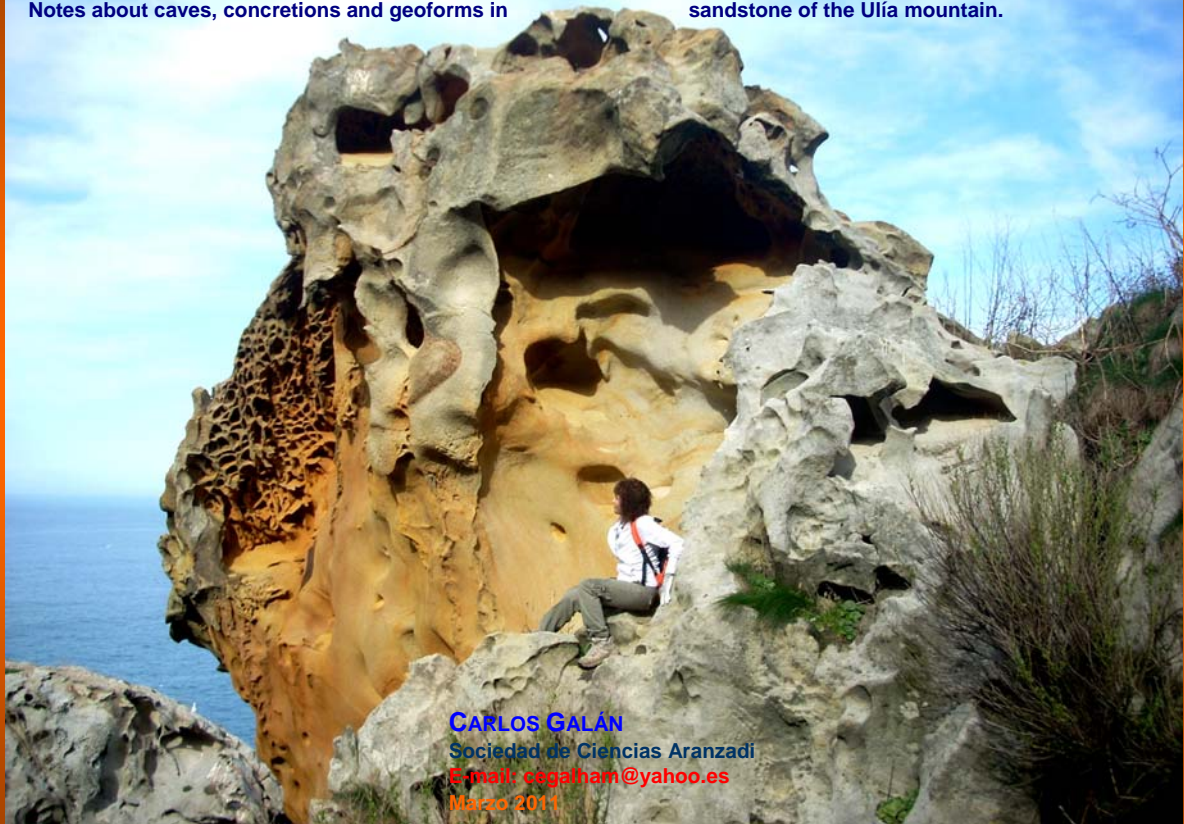


NOTAS SOBRE CUEVAS, CONCRECIONES Y GEOFORMAS EN ARENISCA DEL MONTE ULÍA (SAN SEBASTIÁN).
Notes about caves, concretions and geofoms in sandstone of the Ulía mountain.



CARLOS GALÁN
Sociedad de Ciencias Aranzadi
E-mail: cegalham@yahoo.es
Marzo 2011

NOTAS SOBRE CUEVAS, CONCRECIONES Y GEOFORMAS EN ARENISCA DEL MONTE ULÍA (SAN SEBASTIÁN).

Notes about caves, concretions and geofoms in sandstone of the Ulía mountain.

Carlos GALÁN

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Marzo 2011.

RESUMEN

Se presentan nuevos datos sobre cavidades, boxworks, cannonballs, concreciones y otras geoformas desarrolladas en arenisca carbonática de la Formación Jaizkibel, de edad Eoceno, localizadas en el litoral del monte Ulía (San Sebastián, País Vasco). En la zona se encuentran sistemas de pequeñas cuevas y abrigos, de características remarcables. Se describen las diversas geoformas encontradas, ilustrándolas con fotografías, y se discute su proceso de origen.

Palabras clave: Espeleología física, geología, pseudokarst, arenisca, cuevas, abrigos, boxworks, concreciones, geoformas.

ABSTRACT

We present new data about caves, boxworks, concretions and geofoms developed in carbonatic sandstone of the Jaizkibel Formation, of Eocene age, located in the coast of Ulía mountain (San Sebastián, Basque Country). In the region there are several rock shelters and little cave systems of remarkable traits. The geofoms found are described, being enlightened with photographs. We discuss their origin process.

Key words: Physical Speleology, geology, pseudokarst, sandstone, caves, shelters, boxworks, concretions, geofoms.

INTRODUCCION

En el monte Ulía (San Sebastián, País Vasco) se desarrolla un pseudokarst sobre los estratos más compactos de arenisca de la Formación Jaizkibel (de edad Eoceno) y éste presenta una gran diversidad de cavidades y geoformas, tanto hipógeas como superficiales. Cabe recordar que el flysch de la cadena Terciaria costera es un sistema de turbiditas abisales, producto del desmantelamiento de los sedimentos de una plataforma (Plateau de Las Landas) situada en el borde N Europeo del profundo surco de la cuenca Eocena vasca (Mutti, 1985). Los bancos de arenisca que ahora vemos tienen por consiguiente una larga historia. De tanto en tanto, los sedimentos del borde de la plataforma experimentaban episodios turbulentos, de deslizamientos (slumps) y avalanchas submarinas que localmente (y particularmente en los valles y cañones que disectaban el talud) aportaban depósitos masivos de arenas, las cuales se extendieron sobre el fondo de la cuenca formando grandes abanicos de deyección submarinos. Las capas sucesivas de sedimentos alcanzaron espesores considerables, teniendo la Formación Jaizkibel 1.500 m de espesor preservado.

La colisión y soldadura de las placas continentales Ibérica y Europea, elevaron paulatinamente el territorio para conformar los Pirineos. Las rocas emergidas, expuestas a la erosión, fueron desgastadas, dejando en relieve positivo los estratos de rocas más compactas y, comparativamente, más resistentes a la erosión de superficie. Estas forman abruptos espolones con acantilados, en el frente que da al mar, y escarpes igualmente prominentes en algunos flancos de valle (Figura 1). El fuerte buzamiento de las capas de arenisca y la desigual resistencia a la erosión de los materiales del flysch, comandaron este modelado. Que reúne rasgos debidos a la vez a su litología y dispositivo estructural (Kruit et al, 1972; Campos, 1979; Galán et al, 2007).

Pero además, los bancos de arenisca han sido objeto de un proceso más reciente, que abarca el último millón de años y que prosigue activamente en la actualidad. Este consiste en su karstificación superficial por disolución intergranular de la arenisca. Esta "erosión subterránea" afecta de modo preferente al cemento carbonático que une los granos de cuarzo, pero también, en menor grado, a la sílice de los granos de cuarzo y a otros componentes minoritarios (como micas y feldspatos), alterando los minerales, disolviendo la roca y generando precipitados de distribución irregular. Las cementaciones secundarias en los espacios entre los granos de cuarzo crearon zonas blandas y duras en el interior de la roca, que serán disueltas diferencialmente, generando las cavidades y geoformas que otorgan su peculiar aspecto al pseudokarst de Ulía (Galán & Nieto, 2011). En la presente nota describiremos algunos de los rasgos más significativos de este peculiar pseudokarst y explicaremos su génesis.



Figura 1. En el litoral del monte Ulía, los estratos de arenisca presentan una estructura monoclin, con buzamiento N. La disposición subvertical de los estratos, recortados por la erosión marina, forma abruptos acantilados, de más de un centenar de metros de desnivel. Sobre los estratos más compactos y de mayor potencia se desarrolla un pseudokarst, con numerosas geoformas. Son conspicuas concavidades producto del vaciado de concreciones llamadas cannonballs. Arriba: el litoral entre punta Atalaya y la punta del Faro de La Plata, con el entrante de Cala Murguita. Abajo: abrigos con paredes arenizadas y concavidades de cannonballs.



Figura 2. Pseudoskarst en arenisca del monte Ulía. Geoformas en remanentes de abrigos y paredes casi expuestas. Destaca la gran cantidad de concavidades producto de la meteorización de cannonballs y muy diversos boxworks.



Figura 3. Llamativos diseños sobre la roca arenizada de un abrigo que evidencian difusión y precipitación rítmica en bandeados o anillos de Liesegang. En el lado izquierdo superior varios ejemplos de boxworks.

MATERIAL Y METODOS

El trabajo presenta ejemplos de diversos tipos de cavidades y geoformas descubiertos en el pseudokarst en arenisca del monte Ulía. La ocurrencia de estas geoformas en Ulía era desconocida con anterioridad a estos trabajos. Los datos presentados han sido obtenidos mediante la prospección de parajes poco accesibles, acantilados y enclaves ocultos del litoral, en varios casos de acceso sólo posible mediante el uso de técnicas de escalada y espeleología vertical (Galán & Rivas, 2009; Galán et al, 2011).

Algunas muestras de rocas y geoformas han sido objeto de análisis químico por vía húmeda; otras han sido objeto de comparación con muestras similares de Jaizkibel, las cuales fueron caracterizadas química y estructuralmente por difracción de rayos-X (DRX), espectroscopía Raman y espectrometría por dispersión de energía (EDS) (Galán et al, 2009, 2010). Los ejemplos de geoformas han sido documentados con fotografía digital en campo, en los últimos años.

RESULTADOS

Los afloramientos más compactos de arenisca en Ulía han experimentado un proceso de pseudokarstificación. Las rocas involucradas son turbiditas abisales, constituidas esencialmente por arenisca de cemento carbonático, de edad Eoceno inferior a medio (Campos, 1979). El grosor de los estratos individuales de arenisca en las zonas de estudio de este trabajo alcanza 5-10 m de potencia, presentándose en ocasiones estratos superpuestos que forman escarpes de decenas de metros de desnivel (ver ejemplos en Figuras 6, 8, 11, 20).

Litológicamente se trata de areniscas cuarzosas de colores claros y de cemento carbonático. 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%), y cantidades menores de feldespatos y micas. El cemento, de carbonato de calcio, representa un volumen medio en torno al 10%. Son frecuentes cannonballs (concreciones esféricas o bolas de arenisca más dura), de variable diámetro, desde 10-20 cm a más de 1 m. Estas concreciones están rellenas de cuarzo de grano medio a grueso, con matriz carbonática, muy poca mica y glauconita. La disolución de los estratos de arenisca con cannonballs da lugar a concavidades semiesféricas, posteriormente suavizadas y retocadas por erosión, las cuales otorgan a muchos de sus afloramientos un aspecto de gryère característico.

Las zonas superiores de los acantilados presentan multiplicidad de grutas y pequeñas cuevas, con prominencias ruiformes, pero además pueden hallarse otros ejemplos de cavidades en distintas posiciones topográficas, particularmente en la base de estratos individuales y en la intersección de fisuras con planos de estratificación (Figuras 2 a 4). Cuando los arroyos temporales que recorren los cortos barrancos circundan tramos compactos de arenisca, es frecuente que los perforen sobre cortos trayectos, formando cuevas hidrológicamente activas, de modestas dimensiones (algunos ejemplos pueden verse en las Figuras 7 y 14).

Es importante destacar que algunas de las características observables en la arenisca son debidas a rasgos litológicos adquiridos durante su diagénesis, mientras que otros son producidos por la karstificación. Además muchos de los rasgos del primer tipo son apreciables en el interior de cuevas, grutas y paredes arenizadas, remanentes del proceso de karstificación, y sin la ocurrencia de este último tales rasgos pasarían desapercibidos, ocultos por la meteorización de superficie y las coberturas edáfica y vegetal, que los enmascaran. De hecho, incluso la roca expuesta presenta en superficie una monótona coloración gris, debida a biofilms de alteración superficial, cianobacterias, algas y líquenes, que no permiten distinguir gran cosa, salvo macro-rasgos.

Así, los rasgos kársticos de la formación en gran medida habían pasado desapercibidos. Aunque se conocía la presencia de cannonballs y microformas alveolares, la cavernosidad de la arenisca era atribuida a factores litológicos y a la acción erosiva de superficie. Nuestros trabajos develaron por el contrario que en la arenisca de Ulía se desarrolla un notable pseudokarst, con la ocurrencia de procesos subterráneos comparables a los que presentan rocas silíceas, como las cuarcitas que constituyen los espectaculares tepuys de Venezuela y rocas similares de los escudos de Brasil y Sudáfrica (Galán, 1991).

Lo esencial de esta karstificación incompleta (= pseudokarst) reside en que el agua se infiltra en la roca no sólo a través de fisuras y planos de estratificación, sino intergranularmente, disolviendo a su paso el cemento que une los granos individuales de cuarzo, descohesionando los mismos, y transformando la roca inicialmente compacta en un material poroso, friable y fácilmente disgregable. En consecuencia, la disolución intergranular produce una progresiva y paulatina "arenización" de la roca. Si se consigue concentrar la circulación subterránea se producen fenómenos de tubificación o piping que forman una red de vacíos y conductos. La continuación de este proceso genera cuevas a todas las escalas. De modo inverso se puede producir la precipitación de sustancias disueltas, generando espeleotemas en las cuevas y cementaciones en el interior de la arenisca. Su progresivo retrabajado genera a su vez geoformas en mallas poligonales e irregulares de boxworks, cúpulas, celdas en panal de abejas (honeycomb cells) y muy diversas formas alveolares (ver Figuras 2-6, 8-10, 12, 15-19).

La disolución intergranular de la arenisca es el proceso básico o primario que comanda la formación de cavidades y la creación de geofomas en esta litología. Lo que se traduce a su vez en la morfología de superficie por acusados relieves ruiformes, con cavernosidades, abrigos, grutas y cuevas. Aunque su magnitud es moderada en comparación con el karst clásico desarrollado en caliza y otras rocas fácilmente solubles.



Figura 4. Grandes boxworks y alveolos menores. En la parte inferior destacan residuos de los delicados encajes que dejan las formas cordadas al progresar la arenización de la pared. También se aprecian restos de gangas o envolturas de cannonballs.



Figura 5. Detalles de una envoltura resistente de cannonball, con alto contenido de sílice y minerales de hierro. Puede apreciarse que las fracturas que afectan a la roca-caja de arenisca también han seccionado la envoltura.



Figura 6. Uno de los rasgos más fácilmente apreciables en los estratos gruesos de arenisca de Ulía es la gran profusión de concavidades de cannonballs y la existencia de distintos tipos de concreciones y láminas con alto contenido en hierro. En algunas ocasiones recuerdan el carácter fuerte y a la vez dinámico de las obras del escultor Eduardo Chillida.

Así mismo ha sido documentada la ocurrencia en las cavidades de una gran cantidad de geoformas, incluyendo diversos tipos de boxworks, formas cordadas, concreciones, nódulos, estructuras de corriente, anillos de Lisegang, y espeleotemas de: ópalo-A, yeso, silicatos de aluminio amorfo y oxi-hidróxidos de hierro y manganeso. A menudo con diseños estéticos remarcables (Galán & Nieto, 2010, 2011; Galán et al, 2011). En resumen, un importante conjunto de cavidades, concreciones y geoformas, a las que pasaremos revista en los siguientes apartados.

CANNONBALLS

En la literatura geológica se distingue habitualmente entre concreciones y nódulos. Las concreciones son cuerpos de roca claramente limitados, incluidos entre sedimentos más blandos de la misma composición, y se forman a partir del agua intergranular por precipitación selectiva de los minerales disueltos, comúnmente carbonato de calcio. La siderita (carbonato de hierro) es también un importante cemento. Cuando estos minerales precipitan, rellenan los espacios porosos entre los granos del sedimento, cementándolos juntos. Las concreciones pueden ser masivas y sin estructura, o pueden preservar en su interior fósiles o estructuras sedimentarias internas tal como laminaciones y estratificación cruzada (crossbeds). Los nódulos son cuerpos duros de roca, similares a las concreciones, pero de composición diferente a los sedimentos que los contienen. Pueden formarse también por precipitación selectiva de los minerales disueltos los cuales reemplazan completamente el sedimento original, aunque algunos, tal como los nódulos de siderita, pueden formarse a partir de geles precipitados bajo condiciones reductoras.

Una concreción es un volumen de roca sedimentaria en la cual un mineral rellena y cementa los espacios entre los granos del sedimento. Las concreciones se forman en las capas o estratos sedimentarios que ya han sido depositados, en etapas tempranas de su diagénesis, antes de que el resto del sedimento sea endurecido y litificado como roca. Habitualmente se forman por la precipitación de una considerable cantidad de material cementante en torno a un "núcleo" o "sitio de nucleación", frecuentemente orgánico (un detrito calcáreo, o un fragmento de concha o hueso, por ejemplo) que atrae e inicia la cristalización de los carbonatos (Boles et al., 1985; Scotchman, 1991; McBride et al., 2003; Chan & Parry, 2002). Pero también cualquier impureza o grano mineral puede actuar como núcleo o germen catalizador del proceso.

Los cannonballs de la arenisca de Ulía son así concreciones diagenéticas, cuya composición es muy similar a la de la arenisca encajante, de la cual difieren poco, frecuentemente por su mayor dureza y, a veces, diferencias de color. Su formación tuvo lugar después de la deposición de las arenas, pero antes de su completa litificación, es decir, progresivamente en cada estrato sucesivo durante un extenso período de tiempo (entre 54 y 45 millones de años AP), cuando, bajo la creciente presión y calor debidos a su enterramiento, las arenas iniciaron la cementación y compactación que las transformó en arenisca. Durante este tiempo, con sucesivas avalanchas de turbiditas, ocurrieron muy diversos fenómenos de redeposición y cristalización en el interior del sedimento litificante, y la cementación de las concreciones ocurrió en momentos tempranos, ayudado por la presencia de irregularidades o impurezas que actuaron como sitios de nucleación. El crecimiento de las bolas por sucesiva cristalización será desarrollado en todas direcciones, ya que las masas de arenas son bastante homogéneas en cada estrato, sin ninguna importante heterogeneidad en su estructura sedimentaria. El cemento concrecionante hace que con frecuencia estas bolas sean más duras y más resistentes a la meteorización que el estrato hospedador de arenisca.

Los cannonballs (= bolas de cañón) son conocidos en todo el mundo en rocas sedimentarias, típicamente en areniscas, esquistos y lutitas, donde forman grandes concreciones esféricas. Dependiendo de las condiciones ambientales en el momento de su formación, las concreciones pueden ser creadas en capas concéntricas o en forma masiva, lo que ha sido llamado crecimiento difusivo (Mozley, 1996; Raiswell & Fisher, 2000). En el crecimiento concéntrico, la concreción crece por capas sucesivas de mineral que se va acrecentando en su superficie; el proceso tiene por resultado un crecimiento radial a lo largo del tiempo. En el caso del crecimiento difusivo, la cementación ocurre simultáneamente a través de su volumen, que se transforma en una concreción masiva. En la arenisca de Ulía no hemos hallado cannonballs con una estructura en capas concéntricas, sin embargo, si existen a menudo ocurrencias en que el cannonball en sí está rodeado por una ganga envolvente, que lo delimita y separa de la roca-caja. Estas gangas pueden tener una consistencia arcillosa más blanda, cementada por minerales como calcita o limonita, pero otras veces pueden incluir láminas duras y resistentes de óxidos de Fe y silicatos de Fe y Al. Estas envolturas o gangas de separación si suelen tener en cambio una estructura concéntrica.

Las concreciones más frecuentes en la arenisca de Ulía son así estas bolas de arenisca más dura, denominadas en la literatura geológica internacional "cannonballs". Se presentan en los estratos más compactos de la parte superior de la serie de turbiditas del flysch Eoceno, adoptando formas esféricas, con una litología similar a la roca-caja adyacente, pero más fuertemente cementadas por carbonato de calcio. En forma similar a otras concreciones, resultan más resistentes a la meteorización que la roca encajante que las rodea, y con frecuencia se desprenden y caen hacia la base de los taludes de los relieves en que afloran. Sin embargo, predominan ampliamente las oquedades en la roca, resultantes de su caída o vaciado. Y en realidad son pocas las zonas en que las concreciones esféricas afloran en relieve positivo. Lo que se observa en la mayoría de los casos (y en algunos tramos y zonas con gran profusión) son estas concavidades vaciadas y no los cannonballs en sí.

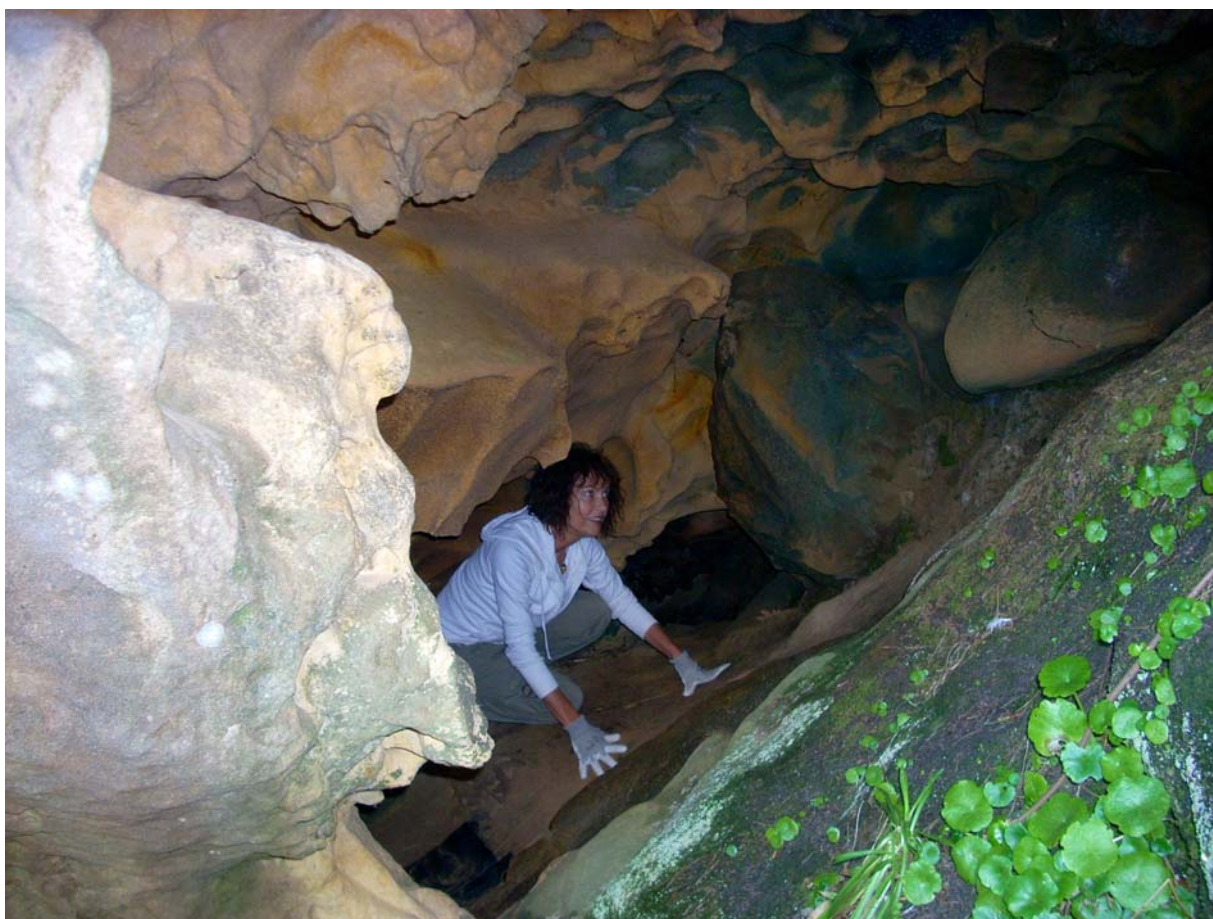


Figura 7. Cueva en arenisca, de moderadas dimensiones, formada por disolución a expensas de un plano de estratificación. Su interior alberga geoformas suavizadas en roca arenizada, espeleotemas de ópalo-A y bandeados de Liesegang.



Figura 8. Los escarpes de arenisca de Ulía albergan boxworks y concavidades que otorgan a la roca un aspecto de gruyère. En las zonas basales y colgadas a distintas alturas hay abrigos y pequeñas cuevas (flecha roja).



Figura 9. Los residuos arenizados de las concreciones carbonatadas llamadas cannonballs dejan curiosos diseños, de llamativo efecto estético, sobre las paredes de roca de los abrigo, a menudo con restos de gangas o envolturas, y grandes boxworks en las bóvedas. La erosión de la recementada superficie externa deja también extravagantes geoformas residuales en relieve positivo. Nótese también bandeados de distinto colorido, que en parte se difunden a partir de las concreciones.

Podría pensarse que en los escarpes verticales las bolas se desprenden con facilidad, pero lo curioso es que en zonas de menor inclinación tampoco se conservan las bolas sino las concavidades vaciadas. Nosotros atribuimos este rasgo a la karstificación de la arenisca (y las concreciones que contiene) por avance de la disolución kárstica intergranular. Debido a que esta afecta preferentemente al cemento carbonático, las concreciones más fuertemente cementadas se arenizan con igual o mayor facilidad que la roca adyacente. El carbonato cálcico del cemento es disuelto y evacuado desagregando las concreciones. Adicionalmente, la presencia de gangas envolventes más blandas también facilita su remoción. En las paredes arenizadas de cuevas y abrigos se observan todos los casos intermedios de arenización de la roca-caja y las concreciones, y es precisamente en estas cavidades (o remanentes de lo que antes lo fueron) en donde se observa mayor número de restos o vestigios de la ocurrencia de cannonballs o de sus gangas envolventes.

Es importante por tanto destacar que la mayor cementación carbonática de las concreciones las puede hacer más resistentes a la erosión de superficie pero no a la karstificación. A diferencia de otros lugares del mundo, donde los cannonballs se observan en relieve positivo, protuyendo de la roca adyacente más blanda, en Ulía se observan concavidades semiesféricas vaciadas. Lo que indica que si bien se trata de concreciones duras son a la vez fácilmente removidas por disolución intergranular, debida a la peculiar karstificación que experimenta la arenisca. En las cuevas y abrigos pseudokársticos se observan múltiples ejemplos de cannonballs arenizados, con diversos grados de alteración, así como ejemplos de concreciones de hierro y anillos de Liesegang (Galán et al, 2008). En algunos raros casos han sido observadas inclusiones (de lutitas o fragmentos orgánicos) en el centro de las concreciones, pero estas habitualmente faltan. Ejemplos de cannonballs arenizados o de sus gangas se muestran en las Figuras 9, 10, 12 y especialmente en la 15. En la Figura 16 se muestra también un ejemplo de nódulos de hierro, pero estos son raros en la formación. Las Figuras 5 y 9 muestran ejemplos de láminas y envolturas de cannonballs con minerales de hierro y/o silicatos de Fe y Al, y la Figura 6 muestra láminas de hierro sinuosas de cierta extensión. Particularmente la Figura 5 es un extraordinario ejemplo de envolturas resistentes de hierro, perfectamente esféricas, y con la apariencia de “conchas de coco vacías”. Este último tipo de concreciones de hierro también han sido halladas en la arenisca de Jaizkibel, siendo notables las “conchas de coco” de la Cueva del Elefante (Galán et al, 2008).

SANDSTONE LOGS

Adicionalmente hemos observado en Ulía concreciones elongadas, en forma de “troncos de arenisca” (= sandstone logs), de la misma naturaleza que los cannonballs, es decir, cementados por carbonato de calcio, pero que se extienden en forma cilíndrica, ahusada y adoptando formas planares. Estas concreciones se desarrollan paralelas a la estratificación. Las formas elongadas de estas concreciones resultan del crecimiento preferente paralelo a la dirección de flujo de paleo-corrientes freáticas (Biek, 2002; McBride et al., 1994; Mozley & Davis, 2005). Ellas son muy comunes en canales de arena de formaciones del Cretácico y Paleoceno en Dakota del Norte (USA), donde llegan a alcanzar varios metros de largo y más de 1 m de diámetro. Su sección transversal suele ser más oval que circular y pueden preservar estructuras sedimentarias. Existen también formas elongadas intermedias entre cannonballs y formas planares más extensas. Los sandstone logs pueden constituir un estado intermedio en la completa litificación de un estrato entero de arenisca. A medida que los troncos (= logs) crecen, pueden coalescer, y formar por último un ancho cuerpo tabular de arenisca (Biek, 2002). Estas concreciones elongadas pueden así representar los estados iniciales de litificación en algunas areniscas.

Su disposición paralela al flujo de paleo-corrientes es una herramienta útil para mapear patrones de paleocanales, ayudando así a entender la configuración del flujo de fluidos en el sedimento en el pasado y las tendencias locales en permeabilidad y velocidad de circulación de las aguas freáticas (Davis, 1999; Jacob, 1973; Mozley & Davis, 2005).

Tanto los logs como los cannonballs muestran al microscopio una composición levemente distinta de la arenisca adyacente, con menor contenido en arcillas y materiales volcánicos. Estos habrían sido altamente alterados, estando ausentes en las concreciones, lo que sugiere que han sido reemplazados parcial o totalmente por la cementación. Lo cual podría explicar a su vez su desplazamiento hacia las gangas envolventes, cuando existen, donde resultarían concentrados.

En Ulía hemos encontrado ejemplos, como en el caso de cannonballs, no tanto de estas concreciones sino de las concavidades que quedan en la arenisca tras su desagregación y vaciado. Algunos ejemplos en paredes de acantilados han sido mostrados en Galán et al (2011).

NODULOS DE SIDERITA

Los nódulos de hierro (o “ironstone”) son pequeñas esferas aisladas, duras, de color marrón oscuro a negro, pudiendo formar delgados lechos. Frecuentemente son más resistentes a la erosión que la arenisca contigua, con la cual contrastan por su color oscuro. Los nódulos de siderita son típicamente hallados en sedimentos ligníticos bentoníticos, donde se concentran en determinados horizontes.



Figura 10. Otros detalles de pequeñas cavidades, con sus paredes y bóvedas internas tapizadas con boxworks y restos de concreciones arenizadas por avance de la disolución intergranular.



Figura 11. El frente acantilado de Ulía que da directamente al mar resulta muy meteorizado, húmedo y cubierto de algas. Es un territorio vertical, muy abrupto y difícil de prospectar, pero también alberga ocultos abrigos y cuevas con geofomas.



Figura 12. Remanentes de abrigos, con restos meteorizados de concreciones y profusamente tapizados de boxworks. Algunos de estos últimos poseen celdas con una especie de anillos silicificados en rebordes prominentes que sugieren la ocurrencia de una previa y fuerte convección, con precipitación de sílice, en el acuífero intergranular.

La siderita es un carbonato de hierro y una importante mena de hierro en muchas partes del mundo, aunque raramente existe como nódulos de siderita en estado puro. Frecuentemente el carbonato de hierro FeCO_3 forma una serie con la rodocrosita (carbonato de manganeso, MnCO_3 , rosado, pero de color negro cuando está alterado) y con la magnesita (un carbonato de magnesio parecido a talco, MgCO_3). Es decir, la siderita, rodocrosita y magnesita son los miembros puros finales de una serie donde existen formas intermedias. El calcio y el cobalto también pueden sustituir en menor extensión el hierro de la siderita, complicando ulteriormente la química de los minerales sideríticos. El color negro de muchos nódulos de siderita proviene de la sustitución parcial de Fe por Mn. La superficie externa de los nódulos de siderita es frecuentemente alterada como limonita, de color marrón oscuro, una compleja mezcla de óxidos e hidróxidos de hierro. Algunos de estos nódulos pueden tener también un color entre negro y púrpura oscuro, probablemente debido a incremento en el contenido de manganeso.

Evidencias de campo sugieren que muchos de estos nódulos son contemporáneos con la sedimentación (Biek, 2002), y que no han sido formados más tarde, como los cannonballs y logs antes citados. Los nódulos probablemente son formados en pozas y depresiones someras en el sedimento, probablemente como geles. La fuente de hierro puede ser simplemente la arcilla. Los films superficiales de óxidos de hierro son comunes sobre las partículas de arcilla. Si estas partículas son depositadas en un ambiente reductor, pobre en oxígeno, el hierro puede retornar a un estado de solución y ser depositado como siderita (Franks, 1969).

Aunque este tipo de nódulos es raro en Ulía, algunos ejemplos son mostrados en las Figuras 15 (superior) y 16 (inferior). La precipitación de hierro puede intervenir de modo análogo en la génesis de otras concreciones halladas en forma de láminas.

ANILLOS DE LIESEGANG

Ha sido expuesto que en la arenisca de Ulía, además de los cannonballs predominantes, existen otros tipos de concreciones y nódulos, con o sin gangas envolventes, y con o sin láminas o envolturas de hierro. A menudo, a partir del alto contenido en hierro de tales láminas, envolturas y concreciones, pueden formarse por difusión y precipitación rítmica una gran variedad de bandeados o anillos de Liesegang, que forman dibujos de gran belleza estética en el interior de las cavidades, sobre la arenisca adyacente (Figuras 3, 9-10, 15, 18-19).

Los anillos de Liesegang (= Liesegang banding) designan diseños en anillos concéntricos o en bandas irregulares, de tonos alternos rojizos, anaranjados y amarillentos. Estos bandeados son conocidos en muy distinto tipo de rocas porosas (tobas volcánicas, ignimbritas y particularmente en areniscas). La noción de anillos de Liesegang se usa ampliamente para describir patrones naturales en forma de franjas paralelas o concéntricas, alternas. Los mismos son formados por precipitación de líneas con alto contenido en minerales de hierro (p.ej.: hematita, limonita, goethita, etc.). Las bandas precipitan por difusión a lo largo de un simple gradiente químico durante un evento. En las rocas, con diferentes sets de bandas, es el resultado de precipitación por movimiento del agua intergranular y pueden ocurrir en varios eventos a lo largo del tiempo, incluso con disolución de los sets más antiguos. La mineralización de hierro a lo largo de estas bandas parece ser inducida por la presencia de interfaces redox (cambios de condiciones reductoras a oxidantes en el agua intergranular) o interfaces de pH (cambios en acidez).

La fuente de hierro puede ser la presencia de núcleos o inclusiones de pirita. Pero en nuestro caso los ejemplos de anillos de este tipo se encuentran en remanentes de las envolturas de cannonballs, láminas y nódulos de siderita u otros compuestos de hierro, pero en localizaciones en las cuales la arenisca ha experimentado procesos pseudokársticos de disolución intergranular y arenización. Ello ha permitido incrementar la porosidad y permitir la difusión y precipitación concéntrica de los minerales de hierro a partir de las sustancias disueltas contenidas en el agua intergranular. Es por tanto un proceso pseudokárstico pero resultado a su vez de la formación de las concreciones y sus envolturas.

Otras concreciones de óxidos de hierro en Ulía pueden adoptar formas irregulares y en láminas, formando capas duras con alto contenido en óxidos de hierro y aluminio (Figura 6). Las costras, láminas y capas, generalmente de pocos milímetros de espesor, poseen a ambos lados arenisca arenizada. También se encuentran ejemplos de láminas en torno a cannonballs de tonos ocres muy oscuros, que probablemente involucran óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso.

BOXWORKS Y ALTERACION ALVEOLAR

En las cavidades del pseudokarst en arenisca de Ulía han sido halladas una gran diversidad de geoformas alveolares y en mallas de celdas hexagonales y poligonales, con estructura que recuerda a los panales de abejas. Las geoformas más grandes de este tipo son grandes hojaldres denominados "boxworks" (= trabajos de encaje) en la literatura geológica.

Las formas alveolares más simples son comunes en rocas porosas en todo el mundo, particularmente en arenisca. Pero las celdas en grandes boxworks son muy raras, y en el caso de Ulía (y otras localidades donde aflora la arenisca de la Formación Jaizkibel) alcanzan dimensiones excepcionales. Puede afirmarse sin duda que este pseudokarst reúne los ejemplos más notables y espectaculares de este tipo de geoformas a nivel mundial, tanto por sus dimensiones, como por sus delicados diseños y colorido.



Figura 13. Existen ejemplos de series o alineaciones de concavidades de cannonballs más o menos paralelos al buzamiento subvertical de los estratos de arenisca. Pero en otros casos su distribución es inhomogénea. También el recorte del relieve externo introduce heterogeneidad y otorga a los afloramientos un aspecto más caótico.

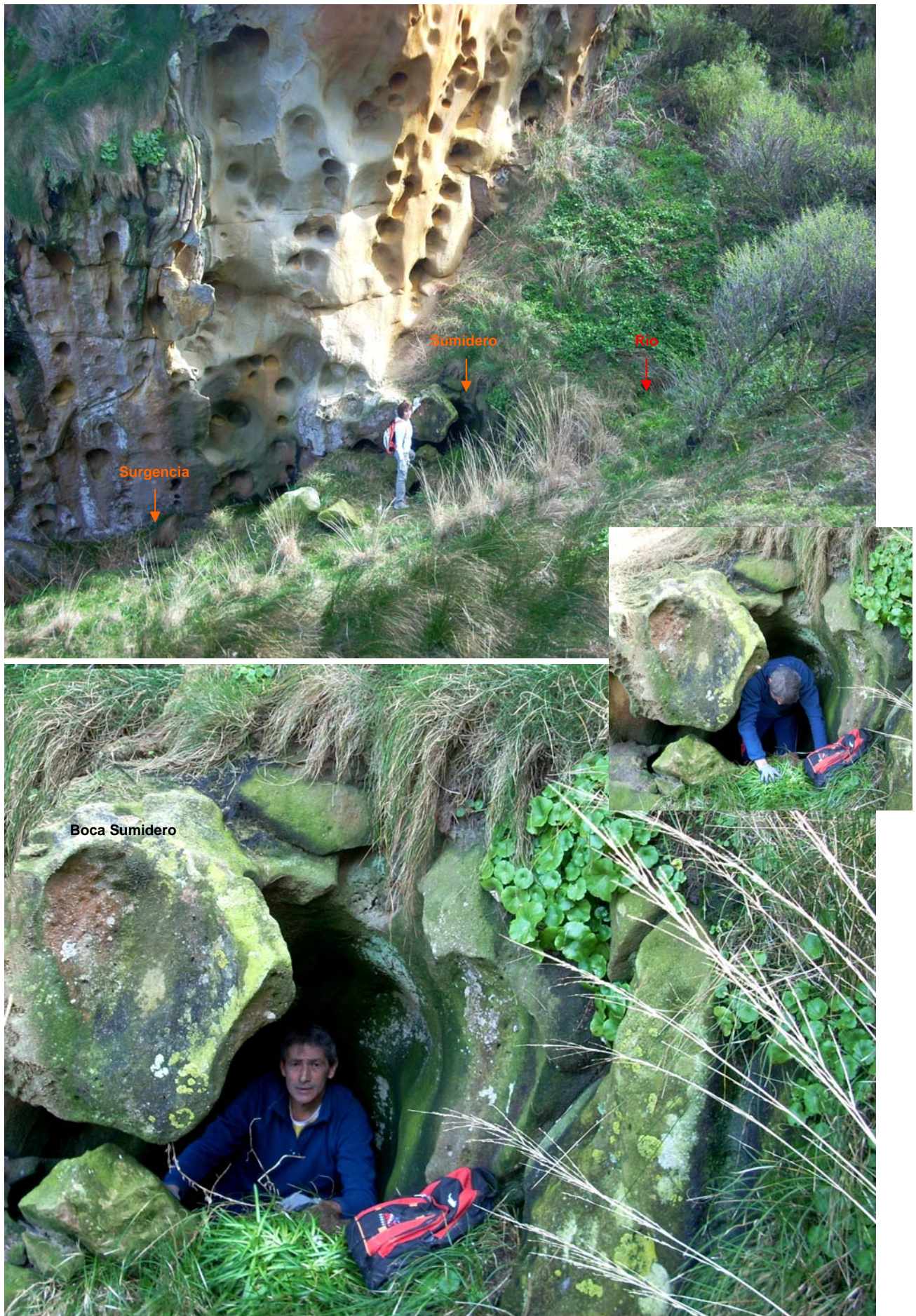


Figura 14. Algunos barrancos y pequeños valles llevan en superficie pequeños cursos de agua (flecha roja), que se sumen y reaparecen repetidas veces en el subálveo del cauce, sin existir verdadera infiltración. Pero en ocasiones perforan tramos de roca compacta excavando pequeñas cuevas, hidrológicamente activas, sobre cortos trayectos (entre flechas naranja).

Por otro lado, sus peculiares características, han permitido estudiar en detalle los mecanismos involucrados en la génesis de estas geoformas. La disolución intergranular en el pseudokarst genera soluciones multicomponentes, cuya reactividad química produce fenómenos de disipación de energía, difusión y convección, propios de sistemas disipativos complejos, no-lineales (Galán, 2010). La fase final de estos procesos es la creación de geoformas poligonales en el interior de las cuevas, las cuales exhiben patrones ordenados, con una geometría fractal, algo que raramente se manifiesta en otros karsts del globo.

La disolución intergranular es responsable de la formación de grutas y cuevas y, dentro de éstas, de la formación de geoformas, desde pequeños alveolos hasta otros con estructuras coraloides, celdas en panal de abejas y grandes hojaldres o box-works; éstos últimos presentan tabiques muy delgados, de diseño poligonal, separando celdas profundas y grandes (de hasta 0,8 m de profundidad y 0,4 m de diámetro de celdas, separadas éstas entre sí por tabiques milimétricos) (Figuras 3-4, 8-10, 12, 16-19). Existen también geoformas cordadas (con forma de cuerdas o cordones entrelazadas) casi totalmente separadas de la pared, a menudo formando delicados encajes, que se han formado al perforarse los tabiques entre celdas (ver p.ej. Figura 3). Tanto los boxworks como las formas cordadas están soportados por silicificaciones locales. Algunas secciones de estas geoformas, vistas al microscopio, muestran la existencia de puentes de sílice secundaria cementando los granos de cuarzo. Es decir, que se han producido silicificaciones, las cuales forman los patrones poligonales duros, en los que los granos de cuarzo resultan unidos por este cemento síliceo de origen secundario, que no existía previamente en la arenisca.

Es importante destacar que esta cementación sílicea de mallas en patrones poligonales, la cual soporta los boxworks, no era conocida ni había sido descrita ni hipotetizada con anterioridad.

Las hipótesis clásicas atribuían la formación de alveolos y celdas en panal de abejas a procesos de "tafonización", un término por demás ambiguo que refiere todas las formas alveolares como "tafoni". Se pensaba que la alteración alveolar y formación de alveolos en la arenisca era debida a fenómenos de erosión eólica de la roca, o bien a haloclastia, o a factores mecánicos que afectaban a la estructura de la arenisca. Pero sin evidencias concluyentes. En nuestro caso, en las areniscas de la Formación Jaizkibel, todas estas hipótesis se han demostrado inconsistentes y especulativas, sin soporte en evidencias reales.

Las geoformas de Ulía tipo boxworks comprenden celdas separadas por tabiques muy delgados, en roca arenizada, cuya cohesión -aunque delicada- está soportada por la existencia en los tabiques entre celdas de una cementación secundaria de los granos de cuarzo de la arenisca por puentes de sílice. Es decir, los tabiques están soportados por silicificaciones que no existían previamente en la roca, sino que son producto de la precipitación, en el interior del acuífero intergranular, de sílice secundaria (no de calcita) generada a partir de la disolución parcial previa de los granos de cuarzo de la arenisca. Un factor por tanto consecuencia de la karstificación de la roca y no de acciones eólicas, haloclastia, ni factores litológicos o estructurales.

La ocurrencia de este proceso pseudokárstico es por tanto novedosa. E implica que, en el acuífero intergranular, ocurre la disolución del cemento carbonático a la vez que una disolución parcial de los granos de cuarzo. Las soluciones intergranulares exportan con facilidad el carbonato cálcico disuelto, pero a la vez permiten la precipitación de sílice, en patrones poligonales. La subsecuente erosión y disolución intergranular remueve con facilidad los granos de arena en las áreas no-cementadas o cementadas por carbonatos, mientras que las mallas síliceas, en este micro-acuífero de porosidad incrementada, no consiguen disolver los puentes de sílice. De este modo se se generan las geoformas que conocemos como boxworks.

HIPOTESIS GENETICA

Para explicar la formación de este tipo de geoformas ha sido propuesto un modelo teórico general en Galán et al (2009) y Galán & Nieto (2010, 2011). Este modelo básicamente postula que la formación de cavidades, alveolos y celdas es un proceso de alteración diferencial, debido en parte a la alternancia de fases de humectación con otras de desecación. Y por tanto existe una coevolución entre factores climáticos y procesos geoquímicos, interviniendo los primeros en su dinamismo.

Según este modelo, resumidamente, la alteración procede básicamente por disolución intergranular: durante las fases húmedas o lluviosas el agua penetra cierta distancia a través de la porosidad de la roca o límites entre los cristales de cuarzo y disuelve a su paso parte de la matriz o cemento carbonático y algo de sílice de los granos de cuarzo; 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 corteza externa. El proceso de evaporación causa que el carbonato y sílice remanentes en el interior de la roca se distribuya desigualmente, dando lugar a áreas blandas y duras, con bajo y alto contenido en carbonatos (y/o sílice), 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 geoformas alveolares. Las delicadas estructuras en panal de abejas y boxworks, 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.

Lo más importante de este proceso, pobremente entendido, es debido a las diferencias entre solubilidad y tasa de disolución en estos sistemas sílice-carbonatos. La solubilidad de la calcita es alta y la de la sílice de los granos de cuarzo baja a muy baja, en las condiciones de pH de las aguas de la zona. Pero existe una disolución parcial de los granos de cuarzo (como lo prueba la precipitación de geles de sílice en espeleotemas de ópalo-A), mientras que la calcita, fácilmente soluble, no precipita sino que es exportada en solución.

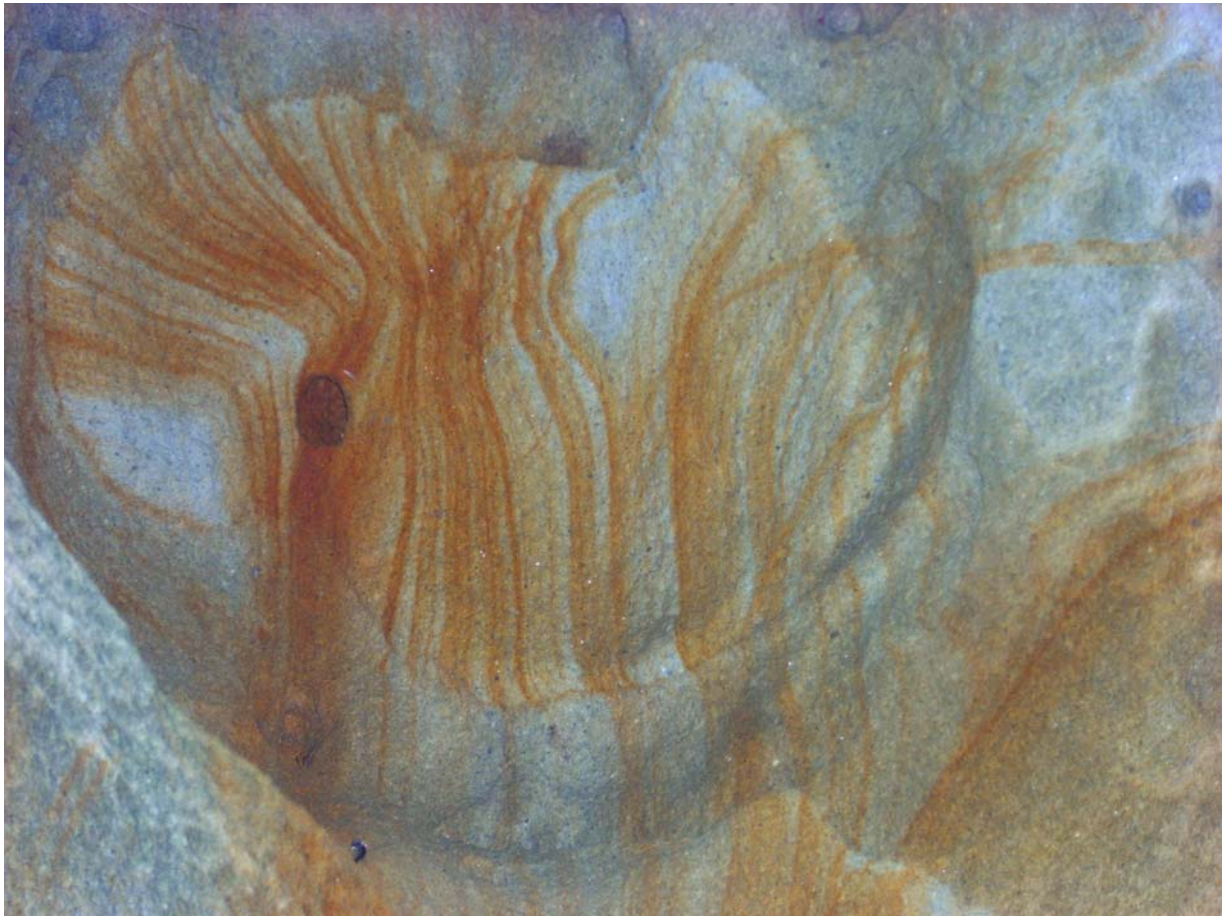


Figura 15. En las cavidades de Ulía se encuentran múltiples ejemplos de concreciones arenizadas, al igual que la roca-caja adyacente, en variables grados. También son frecuentes estructuras de corriente, bandeados y precipitados rítmicos con diversos diseños. Algunos parecen concéntricos, pero otros atraviesan las concreciones.



Figura 16. Detalles de boxworks con rebordes prominentes que sugieren la ocurrencia de convección (arriba) y nódulos de siderita, con gangas envolventes concéntricas de silicatos de hierro y aluminio (abajo).

En las fases iniciales de karstificación, la penetración y circulación intergranular del agua en la arenisca es condicionada por la porosidad de la roca, debida a la estructura primaria de la arenisca. Al comienzo 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 (no la solubilidad), lo que ocurre para el cuarzo pero no para la calcita (Martini, 1982; Mustoe, 1982; Urbani, 1981, 1986).

Por ello, en las fases más tempranas del proceso, o en las zonas internas de la roca donde las circulaciones son más lentas, la sílice de los granos de cuarzo puede también ser disuelta generando sistemas sílice-carbonatos. Igualmente se produce una alteración de los feldspatos y micas contenidos en la matriz. Esta meteorización se produce con facilidad en ambiente húmedo cargado de CO₂ y genera carbonatos y silicatos aluminicos hidratados. El aspecto y coloración de algunas vetas y láminas 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 CO₂ con gran facilidad, y en consecuencia, son evacuados sin precipitar. De hecho no hemos encontrado espeleotemas de calcita en las cuevas, a pesar de que el carbonato de calcio del cemento intergranular es disuelto preferencialmente. Las reacciones en el interior del acuífero intergranular ocurren en función del tiempo de residencia del agua en el mismo, y progresan con mayor facilidad al aumentar las áreas disueltas y, por consiguiente, la porosidad efectiva.

Los pequeños alveolos son formados por remoción simple del cemento carbonático, el cual con frecuencia recementa la superficie externa, que suele presentar un uniforme color gris (influyendo también en ello la presencia de biofilms de alteración debidos a microorganismos), mientras la coloración primaria blanco-amarillenta de la arenisca (en algunos estratos naranja o rojiza) sólo es apreciable en el interior de las cavidades y/o en superficies arenizadas.

Las geoformas de tipo boxworks están soportadas por silicificaciones locales, que de modo similar recementan áreas internas de roca. Sus patrones poligonales corresponden a la ocurrencia de fenómenos de difusión y convección multicomponente, análogos a los que se producen en la convección de Bénard-Marangoni y en los modelos de Turing-Simoyi (Galán, 2010), con el resultado de precipitación y cementación en patrones diversos. Estos son procesos disipativos que exhiben geometría fractal. Y su detonante procede del acoplamiento entre la precipitación de sílice y la de carbonatos.

La formación de patrones es así un mecanismo que opera en un momento determinado en la evolución dinámica del sistema, e involucra fenómenos de difusión y convección. La formación de patrones por reactividad química, difusión y convección, es frecuente en la naturaleza. Una amplia variedad de sistemas fuera del equilibrio exhiben patrones en celdas con simetría hexagonal o poligonal. En sistemas químicos en solución se producen reacciones que generan ondas, las cuales se propagan a través del medio por el acoplamiento de difusión a la reacción química. Turing (1952) fue el primero en proponer un modelo en el cual el acoplamiento de la difusión con la cinética química no-lineal es suficiente para producir soluciones estacionarias, las cuales conducen a inhomogeneidad espacio-temporal. Se pueden generar también gradientes de concentración que alteran la densidad de las soluciones, ocasionando convección (Simoyi, 1991; Nagy & Pojman, 1993; Semwogerere & Schaltz, 2001).

En la cinética de las reacciones que tienen lugar en el acuífero intergranular en la arenisca de Ulía, las sustancias que reaccionan en primer lugar pueden generar ondas que inducen (según su tasa de difusión, concentración de las sustancias, y forma y tamaño de campo) la precipitación rítmica y cementación en patrones diversos. Los patrones hexagonales pueden contener múltiples diseños y pueden evolucionar lentamente hacia patrones desordenados o presentar distintos comportamientos de deformación (Cerisier et al, 2007). Además de los componentes mayoritarios (granos de cuarzo y cemento carbonático) existen muchos otros minoritarios. En análisis de muestras mediante técnicas de microscopía y espectroscopía de transmisión de alta resolución (especialmente espectroscopía Raman), han sido hallados, entre otros, los siguientes minerales: sílice amorfo, calcita, aragonito, anhidrita, aluminita, anatasa, glauconita, magnetita, siderita, silicatos de magnesio y de aluminio (fonolita), sulfuros y sulfatos, óxi-hidróxidos de hierro y aluminio. En adición, las aguas meteóricas que ingresan al sistema pueden contener concentraciones de CO₂ variables, ácidos orgánicos producto de la actividad bacterial y ácidos húmicos, los cuales pueden rebajar sustancialmente el pH y otorgar mayor acidez y agresividad a las aguas, transformándolas en soluciones reactivas, que interactúan a su paso por el acuífero con los componentes minerales de la arenisca.

En consecuencia, se trata de soluciones que involucran una considerable cantidad de componentes, en su química y mineralogía. La disolución intergranular trabaja así sobre sistemas sílice-carbonato, hierro-carbonato, y otros sistemas complejos. Esto, de por sí, constituye una diferencia con el karst clásico y el karst en cuarcita, que introduce posibilidades de reactividad química mayores y posibilidades de reactividad que involucran fenómenos de difusión y convección, con el resultado de precipitación y cementación en patrones diversos (Simoyi, 1999; Galán & Nieto, 2010).

Nuestras observaciones de campo sugieren que los patrones de celdas de los boxworks de Ulía se generan en un momento determinado (situación de inestabilidad) y no en todo el volumen sino en el tramo del acuífero intergranular más próximo a la superficie de las paredes y bóvedas internas de las cuevas, superficies éstas con cierta curvatura y tamaño de campo. Las cavidades pasan de una fase isótropa de crecimiento a otra fase anisótropa, en la que se forman patrones en pequeños dominios, como resultado de un proceso de autoorganización, por mecanismos disipativos que actúan en un momento determinado de la evolución de un sistema abierto, lejos del equilibrio.

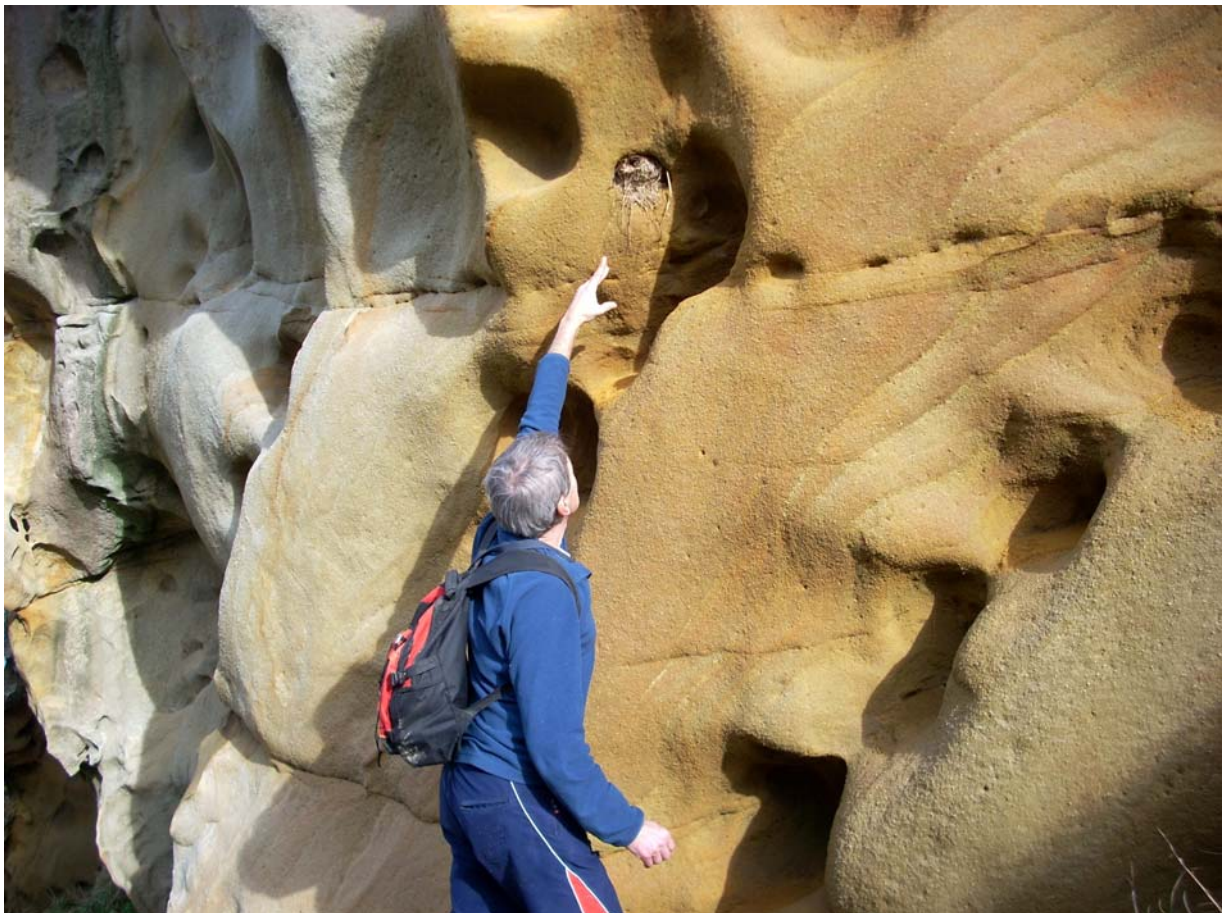


Figura 17. Estructuras de corriente, cannonballs vaciados y boxworks con grandes celdas poligonales. En la imagen inferior detalle de un nido de ave construido aprovechando una oquedad, algo que ocurre con frecuencia en celdas de boxworks.



Figura 18. Algunas cuevas de Ulía contienen geoformas con diseños fractales y coloridos espectaculares, de gran belleza.

Su posterior desarrollo, al proseguir la arenización de la roca, remueve las áreas más blandas y conduce a la formación de boxworks cuyos tabiques resistentes están soportados por estas silicificaciones previas. La geometría fractal de sus patrones, como ha sido dicho, involucra procesos de difusión y convección, propios de sistemas complejos. La desigual cementación de la roca no viene así dada de antemano, sino que es debida a ondas de actividad química, de cuyo comportamiento coherente emergen de modo espontáneo celdas y vórtices de circulación que generan los patrones hallados. La geometría de algunos de ellos resulta espectacular (Figuras 12, 18-19).

Los extravagantes diseños presentes en las geoformas de las cuevas de Ulía sugiere en consecuencia la ocurrencia de diversos procesos, ocasionados por reactividad química, difusión y convección multicomponente en sistemas sílice-carbonato, los cuales entrañan la creación de patrones inusuales. Algo desconocido para el karst clásico y el karst en cuarcita.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

El pseudokarst en arenisca del monte Ulía presenta ejemplos de cavidades y geoformas de importancia comparable a los hallados previamente en el monte Jaizkibel, en la misma formación. Aunque las cavidades hasta ahora encontradas son de dimensiones modestas, su profusión, características y diversidad de geoformas resultan notables.

En las superficies arenizadas de abrigos y escarpes formados por karstificación son muy abundantes las concavidades producto del vaciado de cannonballs, y en el interior de las cavidades se encuentran ejemplos arenizados de cannonballs, sandstone logs, nódulos y concreciones de otros tipos, así como estructuras de corriente de las turbiditas. Su observación resulta posible por la presencia de superficies arenizadas por disolución intergranular, un rasgo característico de la karstificación de la arenisca. De no existir este pseudokarst, tales características primarias de la arenisca permanecerían en gran parte desconocidas.

En adición, la presencia de cuevas, grutas y abrigos, incluye en sus paredes y bóvedas internas la ocurrencia de muchas otras geoformas, tales como alveolos, celdas en panel de abejas, boxworks, formas cordadas, bandeados de Liesegang y varios tipos de espeleotemas, especialmente de ópalo-A y silicatos de aluminio amorfo.

Los factores que controlan la génesis de cavidades y geoformas son múltiples. El proceso fundamental consiste en la disolución intergranular, que areniza y descohesiona la roca, transformándola en un material friable, fácilmente permeable y erosionable. Pero además, la precipitación que tiene lugar en los espacios porales del acuífero intergranular, genera áreas con cementaciones secundarias de distinta dureza y solubilidad. La reactividad de las soluciones en el interior del acuífero ocurre de diversos modos: de forma sencilla, propia de sistemas lineales, como es el caso de la remoción del carbonato de calcio o su desigual precipitación en superficie; o de forma compleja, propia de sistemas no-lineales, donde se producen fenómenos de disipación de energía, difusión y convección, los cuales crean precipitación rítmica de minerales de hierro (como en los anillos de Liesegang) y precipitación en mallas poligonales de sílice (como en formas alveolares con grandes celdas y boxworks). El progreso de la disolución intergranular genera a continuación, en el interior de las cavidades, geoformas poligonales y extravagantes, con diseños fractales, algo que raramente se manifiesta en otros tipos de karsts.

En suma, el pseudokarst de Ulía alberga ejemplos únicos de cavidades y geoformas, a la vez que expone la ocurrencia de fenómenos muy poco conocidos, incluyendo procesos de auto-organización propios de sistemas complejos, no-lineales, en el límite entre la dinámica ordinaria y la teoría del caos (Galán, 2010).

La geometría fractal que exhiben estas geoformas obliga a los científicos a revisar el concepto mismo de complejidad. En los sistemas complejos, las ecuaciones sencillas pueden generar atractores extraños y reglas sencillas de iteración pueden dar lugar a estructuras más complejas de lo que podríamos imaginar jamás (Mandelbrot, 1983; Prigogine, 1967; Prigogine & Stengers, 1984). La idea clásica de la Ciencia, de encontrar reglas sencillas para entender el universo que nos rodea (explicaciones simples para realidades complejas), se invierte en el caso de los sistemas complejos, donde la discrepancia entre simplicidad y complejidad se manifiesta de modo contradictorio.

Las geoformas presentes en la arenisca de Ulía muestran que en los sistemas complejos puede producirse una insospechada riqueza y variedad de comportamientos, con capacidad de auto-organización y amplificación, y que fenómenos aparentemente desordenados y caóticos pueden dar lugar a estructuras ordenadas y hermosos patrones (Galán & Nieto, 2010). La fascinación ejercida por la teoría de sistemas complejos y la geometría fractal, en personas de todas las disciplinas, hace que cada vez más, muchas personas se den cuenta del reduccionismo de las ideas mecanicistas, y de la importancia de la comprensión de los patrones para entender el mundo que nos rodea (Galán, 2010). El pseudokarst de Ulía reúne así rasgos de considerable interés científico y de indudable belleza estética.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos aquellos compañeros y colaboradores de la Sociedad de Ciencias Aranzadi que nos acompañaron en las exploraciones de campo en Ulía y en la obtención de las fotografías que ilustran esta nota. Y de modo especial a Marian Nieto y Jose M. Rivas, por su valiosa ayuda en la prospección de acantilados y enclaves ocultos de difícil acceso.



Figura 19. Pseudokarst de Ulía. Detalles de boxworks con espectaculares diseños fractales.



Figura 20. Algunos barrancos de Ulía presentan cursos de agua con cascadas que caen directamente al mar (debajo). En sus flancos los estratos compactos de arenisca presentan paredes y escarpes acribillados de grutas y abrigos.

BIBLIOGRAFIA

- Biek, B. 2002. Concretions and nodules in North Dakota. North Dakota Geological Survey, Info.ined., 1: 1-6.
- Boles, J.; C. Landis & P. Dale. 1985. The Moeraki Boulders; anatomy of some septarian concretions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55 (3): 398-406.
- Campos, J. 1979. Estudio geológico del Pirineo vasco al W del río Bidasoa. *Munibe, S.C.Aranzadi*, 31(1-2): 3-139.
- Cerisier, P.; S. Rahal & H. Azuma. 2007. Pattern dynamics of the Bénard-Marangoni instability in a medium aspect ratio container. *Second Internat. Symp. Instability and Bifurcations in Fluid Dynamics. Journal of Physics: Conference Series*, 64: 1-9.
- Chan, M.A. & W.T. Parry. 2002. Mysteries of Sandstone Colors and Concretions in Colorado Plateau Canyon Country. *Utah Geological Survey Public Information Series*, 77: 1-19.
- Davis, J.M. 1999. Oriented carbonate concretions in a paleoaquifer: Insights into geologic controls on fluid flow. *Water Resources Research*, 35: 1705-1712.
- Franks, P.C. 1969. Synaeresis features and genesis of siderite concretions, Kiowas Formation (Early Cretaceous), north-central Kansas. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39 (3): 799-803.
- Galán, 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.
- 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, 30 pp.
- Galán, C. & M. Nieto. 2010. Bandas de Moebius, Boxworks y otras raras Geoformas en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag web aranzadi-sciences.org. Archivo PDF, 30 pp.
- Galán, C. & M. Nieto. 2011. El pseudokarst en arenisca del monte Ulía (Formación Jaizkibel, San Sebastián): notas biológicas y geológicas. Pag web aranzadi-sciences.org. Archivo PDF, 28 pp.
- Galán, C. & C. Oyarzabal. 2009. Análisis por microscopio electrónico de barrido (SEM) y microanálisis por dispersión de energía (EDX) de una muestra de Paramoudra (Formación Jaizkibel, País Vasco). P.web aranzadi-sciences.org. Archivo PDF, 10 pp.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2007. Pseudokarst en arenisca del flysch costero Eoceno, Gipuzkoa. *Lapiaz*, 31: 1-44. + Pag web aranzadi-sciences.org. Archivo PDF, 44 pp.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2008. Estructuras de corriente en turbiditas del flysch Eoceno. Pseudokarst en arenisca, Gipuzkoa (País Vasco). Pag web aranzadi-sciences.org. Archivo PDF, 32 pp.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2009. Formes pseudokarstiques dans le grès du flysch éocène côtier en Guipúzcoa (Pays basque espagnol). *Karstologia, Assoc. Franc. Karstol. & Fed. Franc. Spéléol.*, 53: 27-40.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2011. Los acantilados de Ulía, sus cavidades y geoformas (San Sebastián, País Vasco). P. web aranzadi-sciences.org. Archivo PDF, 26 pp.
- Galán, C.; C. Vera Martin & M. Molia. 2009. Análisis por espectrometría Raman y XPS de muestras de Paramoudras en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag. web aranzadi-sciences.org. Archivo PDF, 11 pp.
- Galán, C.; C. Vera Martin & M. Molia. 2010. Datos por espectrometría Raman y difracción de rayos X (DRX) de envolturas (gangas de separación) y tubos de Paramoudras en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag. web aranzadi-sciences.org. Archivo PDF, 11 pp.
- Jacob, A.F. 1973. Elongate Concretions as Paleochannel Indicators, Tongue River Formation (Paleocene), North Dakota. *Geological Society of America Bulletin*, 84: 2127-2132.
- Kruit, C.; Brouwer, J. & P. Ealey. 1972. A Deep-Water Sand Fan in the Eocene Bay of Biscay. *Nature Physical Science*, 240: 59-61.
- Mandelbrot, B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. Ed. Freeman, New York.
- 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.
- McBride, E.; M.D. Picard & R.L. Folk. 1994. Oriented concretions, Ionian Coast, Italy: evidence of groundwater flow direction. *Journal of Sedimentary Research*, 64: 535-540.
- McBride, E.; M.D. Picard & K.L. Milliken. 2003. Calcite-Cemented Concretions in Cretaceous Sandstone, Wyoming and Utah, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 73 (3): 462-483.
- Mozley, P.S. & J.M. Davis. 2005. Internal structure and mode of growth of elongate calcite concretions: Evidence for small-scale microbially induced, chemical heterogeneity in groundwater. *Geological Society of America Bulletin*, 117: 1400-1412.
- Mustoe, G. E. 1982. The origin of honeycomb weathering. *Geological Society of America*, 93:108-115.
- Mutti, E. 1985. Turbidite systems and their relations to depositional sequences. In: Provenance from arenitas. *Proceeding Nato-Asi meeting, Cetraro-Cosenza, Italy. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Netherlands*, 65-93.
- Nagy, I.P. & J.A. Pojman. 1993. Multicomponent convection induced by fronts in the chlorate-sulfite reaction. *J. Phys. Chem.*, 97 (13): 3443-3449.
- Prigogine, I. 1967. Dissipative structures in chemical systems. In: S. Claessens (Ed). *Fast reactions and primary processes in chemical kinetics*. Interscience, New York.
- Prigogine, I & I. Stengers. 1984. *Order out of Chaos*. Ed. Bantam, New York.
- 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.
- Scotchman, I.C. 1991. The geochemistry of concretions from the Kimmeridge Clay Formation of southern and eastern England. *Sedimentology*, 38: 79-106.
- Semwogerere, D. & M. Schaltz. 2001. Evolution of hexagonal patterns from controlled initial conditions in a Bénard-Marangoni convection experiment. *Cent. Nonlinear Sci. & School of Physics, Georgia Inst. Technol., Atlanta*, 2001: 1-4.
- Simoyi, R. 1999. Pattern formation and symmetry-breaking bifurcations fueled by dissipation of chemical energy: a possible model for morphogenesis? *Pure Appl. Chem.*, 71 (6): 1007-1017.
- Turing, A. 1952. The chemical basis of morphogenesis. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, (B) 237: 37-72.
- 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.