

**PSEUDOKARST EN ARENISCA EN EL MONTE ULÍA (SAN SEBASTIÁN - FORMACIÓN JAIZKIBEL):  
NOTAS BIOLÓGICAS Y GEOLÓGICAS.**

Sandstone pseudokarst in Ulía mountain (San Sebastián - Jaizkibel Formation): biological and geological notes.



Carlos GALÁN & Marian NIETO  
Sociedad de Ciencias Aranzadi. Laboratorio de Bioespeleología.  
E-mail: cegalham@yahoo.es  
Febrero 2011.

# **PSEUDOKARST EN ARENISCA EN EL MONTE ULÍA (SAN SEBASTIÁN - FORMACIÓN JAIZKIBEL): NOTAS BIOLÓGICAS Y GEOLÓGICAS.**

**Sandstone pseudokarst in Ulía mountain (San Sebastián - Jaizkibel Formation): biological and geological notes.**

---

**Carlos GALÁN & Marian NIETO**

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

**E-mail: cegalham@yahoo.es**

**Febrero 2011.**

## **RESUMEN**

En el monte Ulía se desarrolla un pseudokarst en arenisca carbonática de la Formación Jaizkibel, de edad Eoceno. Se presentan datos geológicos y biológicos obtenidos del estudio de cuevas, túneles y abrigos descubiertos en la región. La fauna cavernícola incluye especies troglófilas y troglobias de hirudíneos (Gnatobdellida), crustáceos (Hadziidae, Oniscidae), pseudoescorpiones (Neobisiidae), diplópodos (Lulidae), colémbolos (Entomobryidae, Neanurinae) y otros taxa. Se presentan también datos sobre la utilización de biotopos en geoformas pseudokársticas por parte de la flora y fauna de superficie. Se describen las cavidades, ambientes, espeleotemas y geoformas encontradas, ilustrándolas con fotografías.

*Palabras clave:* Espeleología física, biología, geología, pseudokarst, cuevas, arenisca, espeleotemas, boxworks, geoformas, ecología.

## **ABSTRACT**

In Ulía mountain there is a pseudokarst developed in carbonatic sandstone of the Jaizkibel Formation, of Eocene age. We present geological and biological data obtained from the study of caves, tunnels and shelters discovered in the region. The cave-dwelling fauna includes troglophile and troglobian species of leeches (Gnatobdellida), crustaceans (Hadziidae, Oniscidae), pseudoscorpions (Neobisiidae), millipedes (Lulidae), springtails (Entomobryidae, Neanurinae) and other taxa. We also present data about the use of biotopes in pseudokarstic geoforms by flora and fauna of the surface. The cavities, environments, speleothems and geoforms found are described, being enlightened with photographs.

*Key words:* Physical Speleology, biology, geology, pseudokarst, caves, sandstone, speleothems, boxworks, geoforms, ecology.

## **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. Estos ambientes proporcionan refugio y abrigo a una gran variedad de animales y plantas, constituyendo biotopos peculiares que raramente se encuentran cuando esta morfología falta.

En el medio epígeo, la cavernosidad y cavitaciones que posee la roca, formadas básicamente por karstificación de la misma a través de procesos de disolución intergranular, genera microambientes que son utilizados por plantas, vertebrados e invertebrados. Esta utilización de biotopos kársticos por la biota epígea se extiende también a geoformas en zona de penumbra en el interior de abrigos y cavidades más profundas. Las celdas de los boxworks son así utilizadas para la nidificación de aves y diversas mesocavernas suministran refugio a micromamíferos, como ratones y topillos. Especies mayores, tales como zorros y mustélidos, usan como madrigueras galerías y anfractuosidades de la roca en el interior de las mismas.

La exploración de túneles artificiales (Figuras 1-7) ha permitido constatar que estos pueden interceptar circulaciones hídricas subterráneas y mesocavernas incluidas en la serie estratigráfica. En estos ambientes habitan especies acuáticas y terrestres de animales cavernícolas, incluyendo formas troglobias. Otras especies de invertebrados troglófilos están presentes en las cuevas de la región, así como quirópteros de hábitos cavernícolas.

A lo largo del texto daremos una visión de la ecología de estos ambientes, así como de su soporte físico. Las cavidades en arenisca poseen también espeleotemas, cuya mineralogía difiere de la que es habitual en el karst clásico en caliza. Pero sobretudo las cavidades presentan una notable variedad de geoformas, producto del modelado por las aguas subterráneas que circulan intergranularmente en los estratos de arenisca, además de a través de diaclasas y conductos. En el seno de este acuífero intergranular se dan procesos de disolución del cemento carbonático, pero también ocurre una disolución parcial de los granos de cuarzo, y de componentes minoritarios como feldespatos y micas, con la generación de soluciones multicomponentes. La reactividad química de estos sistemas produce fenómenos de disipación de energía, los cuales generan patrones de convección. El resultado es la creación de geoformas poligonales y bandeados rítmicos, tales como boxworks y anillos de Liesegang.

Los diseños de estos patrones muestran una geometría fractal, donde la complejidad de las soluciones multicomponentes genera patrones ordenados, mostrando a su vez que la naturaleza es inexorablemente no-lineal. Los fenómenos no-lineales dominan en el mundo inanimado mucho más de lo que creíamos y constituyen a la vez un aspecto esencial de los patrones o pautas que conectan los fenómenos en los sistemas vivos (Galán, 2010). 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).

El pseudokarst de Ulía presenta una gran riqueza y diversidad de formas, especies y fenómenos inter-relacionados, geológicos y biológicos. En las cavidades encontramos patrones propios de estructuras disipativas y formas inusuales en hidrogeología del karst, característicos de sistemas complejos. Así, este territorio -tan próximo a la ciudad de San Sebastián- contiene pequeños enclaves ocultos, que han pasado desapercibidos, y que sin embargo suministran excelentes ejemplos didácticos de coevolución entre organismos, clima y corteza terrestre, los cuales serán descritos. El presente trabajo amplía y complementa notas anteriores sobre los acantilados de Ulía, sus cuevas y geoformas (Galán & Rivas, 2009; Galán et al, 2011).

## MATERIAL Y METODOS

Los datos presentados han sido obtenidos a través de prospecciones bioespeleológicas efectuadas en el Monte Ulía a partir de finales de los años 1990's. Los taxa cavernícolas han sido colectados en túneles y cuevas mediante redes manuales de plankton, pinzas y pinceles de relojero, utilizando alcohol etílico de 70° como conservante. Los materiales colectados están depositados en la Colección de Bioespeleología de la Sociedad de Ciencias Aranzadi. Los mismos han sido estudiados en laboratorio con empleo de microscopio binocular y han sido identificados hasta diversos niveles taxonómicos, a tenor de la bibliografía disponible para los distintos grupos zoológicos. Las identificaciones a nivel específico han sido revisadas por especialistas. Datos ecológicos complementarios han sido transcritos a informes y están documentados con fotografía.

Las cavidades y puntos de interés han sido catalogadas, con datos de situación, coordenadas UTM y altitud, compatibles con el Sistema de Información Geográfica de Gipuzkoa (b5m.gipuzkoa.net). Las cavidades de mayor desarrollo han sido topografiadas con instrumental Suunto de precisión y sus planos han sido dibujados con programa Freehand en formato digital. Algunas muestras de espeleotemas y geoformas han sido objeto de análisis químico, y otras son comparadas con muestras de Jaizkibel caracterizadas química y estructuralmente por difracción de rayos-X (DRX), espectroscopía Raman, microscopio electrónico de barrido (MEB) y espectrometría por dispersión de energía (EDS). Muestras de roca han sido caracterizadas por análisis químico por vía húmeda y fluorescencia de rayos-X. Los ejemplos de geoformas han sido documentados con fotografía digital en campo, en diversas fechas.

## RESULTADOS

Un primer grupo de resultados ha sido obtenido del estudio de túneles, particularmente de un antiguo túnel artificial perforado para captación de aguas, cuya galería tiene 40 m de longitud y 2 m de diámetro, catalogado como Ulía Túnel (Nº CEG: 1800). Este tipo de túneles es interesante porque -a modo de sondeo- perfora y atraviesa la serie de arenisca dando una buena visión de su estructura interna a lo largo de un importante espesor.

Las prospecciones del Medio Subterráneo Superficial (MSS) en Gipuzkoa (Galán, 2001) ya habían mostrado que el flysch costero de areniscas constituye un medio fisurado y permeable, el cual presenta acuíferos subterráneos que generan ininidad de pequeños manantiales y fuentes permanentes. Aunque la desagregación de la roca en arena y arcillas es poco propicia para la formación de mesocavernas, localmente, y particularmente en los estratos más compactos, ocurren desarrollos interesantes. El túnel citado intercepta la fisuración y algunas mesocavernas. A mitad de su recorrido, la intercalación de pequeños bancos de lutitas, menos consistentes, ha producido un derrumbe, donde el tramo colapsado produce una elevación del suelo que casi obstruye el paso a la vez que la bóveda se eleva y forma una ampliación de 6 m de altura. La existencia de este derrumbe genera una zona profunda en oscuridad total, con microclima similar al de una cueva natural (Figuras 1-7). El túnel presenta un canal que recoge el agua de infiltración, generando un pequeño río subterráneo, emergente, con pozas formadas por ampliación a expensas de los estratos más blandos de la serie.

En cuanto a fauna, preliminarmente observamos una asociación parietal en la zona de entrada, en penumbra, con presencia de dípteros, lepidópteros, opiliones y araneidos. En zona oscura observamos fauna terrestre con predominio de araneidos y fauna acuática con anélidos hirudíneos Gnatobdellida (Herpobdellidae) y pistas en el sedimento arcilloso del fondo de probables anfípodos (Galán, 2001). Salidas y trabajos posteriores permitieron identificar dípteros (Culicidae, Phoridae y Mycetophilidae); lepidópteros *Triplosa dubitata* (Linnaeus) (Geometridae); araneidos *Tegenaria inermis* Simon y *Chorizomma subterranea* Simon (Agelenidae), *Meta merianae* Latreille (Argiopidae); colémbolos *Tomocerus sp.* (Entomobryidae); isópodos *Oniscus asellus* Linné (Oniscidae); diplópodos *Mesoiulus cavernarum* Verhoeff (Lulidae); anfípodos *Pseudoniphargus vasconiensis* Notenboom (Hadziidae).



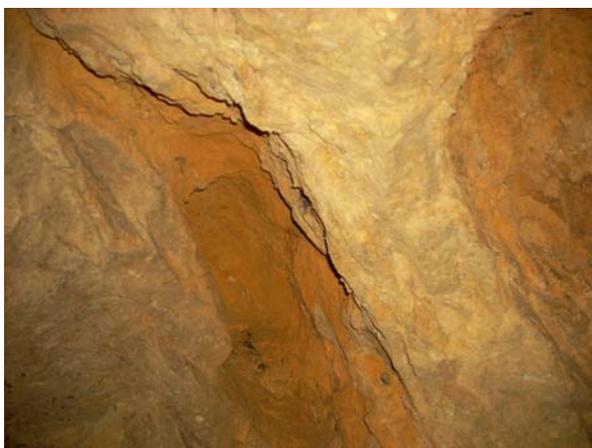
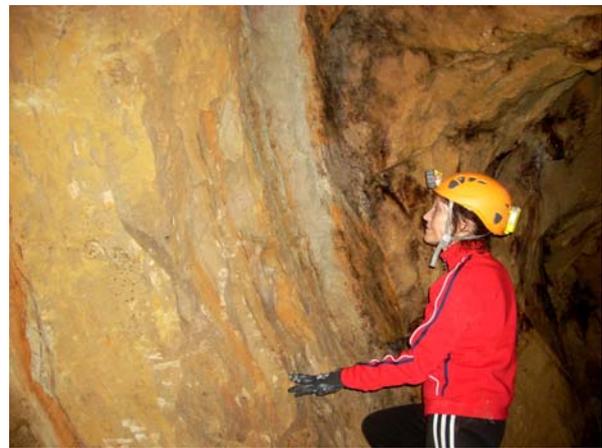
**Figura 1.** Ulía Túnel. Detalle de paredes y derrumbe en la parte media que casi obstruye la galería, creando un ambiente en oscuridad total en su parte interna, con características comparables a las de una cavidad natural.



**Figura 2.** Ulía Túnel (Nº CEG: 1800). Aspecto general y zona de entrada. La excavación artificial atraviesa 40 m de espesor de la serie estratigráfica en areniscas Eocenas.



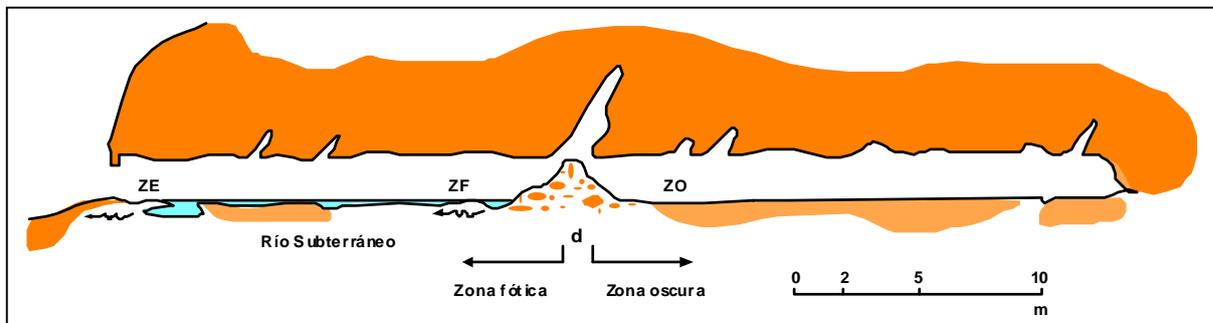
**Figura 3.** Lado interno del derrumbe en Ulía Túnel y espeleotemas de ópalo-A (en aristas, flechas rojas) y oxi-hidróxidos de hierro y manganeso (manchas negras).



**Figura 4.** Detalles de Ulía Túnel en su zona terminal. Fondo de la galería (arriba), detalles de ampliaciones laterales (izquierda), con estratos de lutitas y espeleotemas de silicatos de aluminio y oxi-hidróxidos de hierro (derecha). Algunas ampliaciones laterales interceptan y comunican con mesocavernas naturales.

El túnel también presenta pequeños acúmulos de guano de quirópteros y han sido observados ejemplares hibernantes de *Rhinolophus ferrumequinum* (Schreber) (Rhinolophidae) y ejemplares veraneantes de *Pipistrellus kuhli* (Kuhl) (Vespertilionidae).

En zona de penumbra próxima a la boca existen tapices de algas y cianobacterias, así como curiosos ejemplares de hongos imperfectos que crecen como pequeños bastoncitos milimétricos sobre la roca y al madurar desarrollan un sombrero plano en orlas concéntricas que se asemeja a pequeñas hojas secas (Figura 8).



**Plano 1.** Ullía. Túnel en areniscas del flysch Eoceno (Perfil longitudinal). ZE = Zona de entrada, en penumbra. ZF = Zona fótica, oscuridad acentuada. ZO = Zona oscura. d = derrumbe.

Las filtraciones de aguas subterráneas que percolan hacia la galería dan origen también a espeleotemas, entre las que hemos encontrado: pequeñas formas botroidales y coraloides marrones de ópalo-A ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , óxido de silicio hidratado), geles rojizos y negros de óxidos e hidróxidos de Fe y Mn (que incluyen magnetita, hematita, goethita, todorokita), recubrimientos milimétricos blancos de silicatos de aluminio amorfo, pequeñas coladas blancas que podrían contener cristales de yeso y de calcita (Figuras 3-7). Algunas de estas espeleotemas tienen un origen biogénico, particularmente las de ópalo y silicatos de Al. Los análisis por espectroscopía Raman y espectroscopía por dispersión de energía (EDS) de muestras de espeleotemas similares de otras cuevas de Jaizkibel (Galán & Vera Martín, 2010, 2011) indican que también suelen estar presentes trazas de muchos otros elementos, habiéndose detectado, entre otros: bario, sodio, potasio, titanio, magnesio, calcio, carbono y azufre. Las aguas que circulan a través del acuífero intergranular en la arenisca poseen así soluciones multicomponentes, donde están presentes no sólo sílice y carbonatos, sino también Fe, Al y muchos otros elementos.

La reactividad química de estas soluciones puede originar a su vez procesos de convección y precipitación rítmica en el interior de la roca, generando patrones en mallas poligonales de material recementado por silicificaciones locales y bandeados rítmicos de óxidos de hierro y/o aluminio. Su posterior retrabajado en la superficie interna de las cavidades y abrigos dará origen a boxworks, formas cordadas y formas alveolares de distintos tipos, así como a láminas y concreciones envolventes de cannonballs.

En su conjunto estos ambientes muestran que en el interior del volumen de arenisca se producen fenómenos propios del karst, a pequeña escala, con circulaciones subterráneas, donde tienen lugar procesos de disolución de la roca, formación de cavidades y precipitación de minerales secundarios (= espeleotemas), en algunos casos con intervención de microorganismos. En las cavidades, naturales o artificiales, con cierto grado de desarrollo y zonas en oscuridad total, se presenta así mismo una fauna de invertebrados y vertebrados cavernícolas, comparable a la del karst clásico en caliza. Pero además, se producen también fenómenos que no son propios del karst, que involucran soluciones multicomponentes en sistemas sílice-carbonatos, y que darán origen a una multiplicidad de geoformas inusuales, características de esta litología.

Un segundo grupo de resultados es el que involucra al citado conjunto de geoformas inusuales. Y que se expande de modo extraordinario y asombroso en las cavidades más superficiales, grutas y abrigos. El primer rasgo a destacar es la cavernosidad de este modelado (Figuras 9-12), que no es propio de la roca en sí (la cual es muy compacta) sino resultado de la pseudokarstificación.

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). 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 (Figuras 12-17).

En todos los casos se trata de geoformas en la roca-caja arenizada 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 concreciones de distinto tipo, que han sido meteorizados diferencialmente (Figuras 17-20).



**Figura 05.** Diseños fractales en Ulía Túnel debidos a estructuras de corriente y precipitados de óxidos de hierro.



**Figura 6.** Ulía Túnel. Coladas de silicatos de aluminio amorfo y oxihidróxidos de hierro y manganeso (arriba). Detalles del pequeño río subterráneo que recorre la galería, donde habitan especies dulceacuícolas de hirudíneos y anfípodos (debajo).



**Figura 7.** Ulía Túnel. Diversos detalles de bancos delgados de lutitas intercalados entre las areniscas en el área de derrumbe (imágenes superiores) y algunas espeleotemas de silicatos de aluminio (manchas blancas, imágenes inferiores). Junto a ellas se encuentran otras por analizar que probablemente contienen ópalo-A y yeso, ya que su morfología es similar a las de otras cuevas de Jaizkibel (particularmente las de la imagen del ángulo inferior izquierdo, que se hallan junto a biofilms de algas y cianobacterias en la proximidad de la boca de acceso).



**Figura 8.** Curiosos ejemplos de hongos imperfectos. Su forma inicial es de bastoncitos (de unos 5 mm) pero crecen hasta desarrollar sombreros de 1-2 cm con aspecto de pequeñas hojas secas, en las bóvedas cercanas a la boca de Uliá Túnel. Nótese también la presencia de eflorescencias blancas y de gotitas de agua de condensación semisuspendidas de filamentos.

También existen diseños complejos debidos a la intersección de las superficies topográficas curvas de las galerías y paredes internas, con la geometría de las geoformas, de llamativos efectos estéticos (Figuras 14-17). Formas similares a las de los abrigos se presentan, en menor grado, en paredes externas (expuestas a la intemperie) en proceso de arenización, generalmente protegidas por extraplomos o rebordes protectores (Figura 18). 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 algo 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 hídrica y eólica. Esta última puede desgastar por deflación las zonas de roca más blandas, generando agujeros, tubos, ventanas, arcos y puentes de roca, por demás frecuentes en las zonas de aspecto ruinoso. Pero en todos los casos actuando sobre roca que ya ha sido arenizada y es poco compacta.

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). 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. Y por tanto existe una coevolución entre factores climáticos y procesos geoquímicos, interviniendo los primeros en su dinamismo.

Según este modelo 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 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 (Figuras 9-12, 14, 19). El proceso de evaporación causa que el carbonato y sílice remanente en el interior de la roca se distribuya desigualmente, dando lugar a áreas blandas y duras, con bajo y alto contenido en carbonato (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.

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 la arenisca. 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, lo que ocurre para el cuarzo pero no para la calcita (Martini, 1982; Mustoe, 1982). 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 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 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 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 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 más grandes, 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 o de 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. Y no es explicado por la simple disolución intergranular, sino que 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).



**Figura 9.** La karstificación de la arenisca en Ulía deja paisajes ruiformes, con infinidad de cavernosidades, puentes de roca, abrigos y cuevas, a diferentes escalas.



**Figura 9.** Otros ejemplos de paisajes ruiformes en el pseudokarst de Ulía, con numerosas pequeñas grutas y oquedades.



**Figura 9.** Algunas de las cavidades de Ulía contienen pequeñas cámaras que dan paso a prolongaciones internas. En el interior de las cavidades se observa el color primario de la arenisca y geoformas que alcanzan los bordes externos. En superficie la roca-caja muestra una monótona coloración gris, por meteorización y recubrimiento por biofilms.



**Figura 9.** La karstificación del borde superior de acantilados en Ulía deja remanentes ruiformes, acibillados de cavidades y con una gran diversidad de formas alveolares sobre las paredes y bóvedas internas de abrigos y cuevas.

En estructuras disipativas es clásico el ejemplo de los patrones de convección de Bénard y los patrones de rizos y bandas paralelas de Belousov. Otros ejemplos de patrones de difusión y convección por reactividad química han sido expuestos en un trabajo previo (Galán & Nieto, 2010), incluyendo ejemplos en medio poroso y convección multicomponente.

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 puede suscitarse competencia entre patrones distintos, donde cada diseño posee una diferente longitud de escala característica. También pueden evolucionar lentamente hacia patrones desordenados o presentar distintos comportamientos de deformación (Cerisier et al, 2007; Colinet et al, 2002; Young & Riecke, 2002). Cuando el campo no es uniforme o incluye perturbaciones topográficas, se puede generar una gran variedad de patrones (hexagonales, triangulares, pentagonales) y cambios de escala en el tamaño de celdas. Dependiendo de las mezclas de fluidos, una convección incluso débil puede ocasionar comportamientos diferentes según el número de componentes involucrados. Así, las mezclas ternarias exhiben mayor diversidad y complejidad que las binarias, debido a difusión molecular cruzada y flujos dependientes de otras variables, tales como gradientes de densidad, gravitacionales y térmicos.

En la arenisca de Ulía, además de los componentes mayoritarios (granos de cuarzo y cemento carbonático) existen muchos otros minoritarios. En análisis de muestras efectuados en relación al estudio de paramoudras mediante técnicas de microscopía y espectroscopía de transmisión de alta resolución (especialmente espectroscopía Raman), han sido hallados, entre otros, los siguientes minerales: sílice autigénico, calcita, aragonito, anhidrita, aluminita, anatasa, glauconita, magnetita, siderita, silicatos de magnesio y de aluminio (fonolita), sulfuros y sulfatos, óxidos de hierro, restos de fragmentos biológicos de foraminíferos, diatomeas, espículas de equinodermos y moluscos (Galán & Vera Martin, 2009; Galán & Oyarzabal, 2009; Galán et al, 2009, 2010). La microfotografía muestra distribuciones heterogéneas, a veces organizadas en torno a cuerpos crecionales formados durante la diagénesis, tal como en paramoudras y cannonballs. En adición, las aguas meteóricas que ingresan al sistema pueden contener diversas concentraciones de CO<sub>2</sub>, ácidos orgánicos producto de la actividad bacteriana 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).

Se ha demostrado bajo condiciones experimentales (p.ej. en biomorfos, Van Den Berg, 2009) que los acoplamientos entre la precipitación de sílice y la de carbonatos, conduce a la ruptura de los cristales iniciales en millones de nanocristales, los cuales se autoorganizan en láminas o inician mecanismos de rizo, dando lugar a formas de curvatura continua y patrones diversos.

Nuestras observaciones 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 determinados grados de curvatura y tamaño de campo.

Las cavidades pasan así de una fase isotrópica 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. Su posterior desarrollo al proseguir la arenización conduce a la formación de geoformas alveolares y boxworks. 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, y que han dejado su impronta en la roca como macroformas.

Los extravagantes diseños presentes en las geoformas de las cuevas de Ulía sugieren 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.

Otro aspecto a considerar es el factor tiempo, un factor a menudo poco tenido en cuenta. Porque cabe recordar 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 geoformas en su interior. Debido a que las zonas arenizadas son progresivamente removidas, la ampliación de las cavidades progresa. Pero obsérvese que, con el paso del tiempo, zonas que hoy son resistentes pueden ser también arenizadas subsecuentemente. De hecho, hemos observado en láminas y concreciones esféricas compactas, como los cannonballs, todas las fases intermedias de progresiva arenización, formación de



Figura 13. Diversidad de geofomas en paredes expuestas y abrigos superficiales en la arenisca de Ulía.



**Figura 14.** Algunos remanentes erosionales de cavidades constituyen túneles someros y puentes naturales de roca, con paredes y bóvedas internas tapizados de boxworks y otras geoformas.



**Figura 15.** Geofomas alveolares y boxworks en el pseudokarst de Ulía. La intercepción de estructuras de corriente genera figuras de interferencia, de curiosos y coloridos diseños.



**Figura 16.** Cavidades superficiales con boxworks, estructuras de corriente y concavidades semiesféricas producto del vaciado de cannonballs, en el pseudo karst de Ulía.

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.

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.

El modelo teórico expuesto proporciona una explicación general y a la vez evidencia que la pseudokarstificación crea patrones internos (que inicialmente no existían) por mecanismos de disipación de energía, asociados al flujo y reactividad de las soluciones, propios de sistemas complejos no-lineales. Algo que raramente ocurre o se manifiesta en el karst clásico o en el karst en cuarcita, pero que en la arenisca de Ulía constituye un rasgo distintivo, destacable a nivel mundial.

En la base de los acantilados de Punta Atalaya han sido hallados algunos ejemplos singulares de Proparamoudras, un tipo de concreciones en la arenisca formadas durante su diagénesis temprana en torno a las trazas fósiles (= ichnofósiles) de tubos de organismos marinos (poliquetos abisales), los cuales han sido descritos en trabajos previos (Galán & Rivas, 2009; Galán et al, 2011), por lo que no repetiremos aquí su descripción. Sólo citar que estas concreciones son muy raras a nivel mundial y los ejemplos de Ulía, sin llegar a la profusión y espectacularidad de los paramoudras que descubrimos en Jaizkibel (Galán & Molia, 2008; Galán et al. 2008), revisten igualmente cierto interés científico, por su curiosa biología y geología.

En las cavidades y geoformas de Ulía la naturaleza opera y muestra su vitalidad de múltiples formas. La biota de superficie encuentra en estos macro y microrelieves, innumerables ambientes que conforman biotopos singulares, estrechamente asociados al sustrato de roca. Además de la fauna de artrópodos cavernícolas previamente citada, en las cavidades de Ulía, particularmente en aquellas más próximas al litoral, hemos encontrado muchas otras interesantes especies de fauna cavernícola troglófila, como el raro pseudoescorpión *Neobisium maritimum* Leach (Neobisiidae) o el colémbolo *Anurida cf. maritima* (Neanuridae). En cavidades con pequeños cursos de agua ha sido hallado también el anfípodo troglófilo *Echinogammarus berilloni* Catta (Gammaridae).

En cavidades en la zona intermareal se encuentra una gran cantidad de crustáceos cirrípedos Thoracica (*Pollicipes cornucopia*, percebes), diversas especies de cangrejos (*Pachygrapsus marmoratus*, Grapsidae; *Portunus puber*, Portunidae) y de moluscos marinos: lapas (*Patella vulgaris*, Patellidae), caracoles (Trochidae, Turbinidae, Littorinidae), mejillones (*Mytilus edulis*, Mytilidae), etc. En realidad, se trata de una fauna común del litoral rocoso, que no debe por tanto ser considerada cavernícola ya que no presenta adaptaciones a la vida hipógea, pero que no obstante penetra algunos metros en zona de penumbra, y en el caso de los percebes y cangrejos, en zonas de oscuridad acentuada. Por encima de los niveles de marea alta, y en sectores más oscuros, se descubre también una fauna litoral compuesta por moluscos prosobranquios (*Littorina*, *Thais*), poliquetos perforantes (*Terebella lapidaria*, Terebellidae) y algunos raros poliquetos errantes (*Nereidae*), así como isópodos *Sphaeroma serratum* (Sphaeromatidae), *Ligia oceanica* (Ligiidae), y -en ambientes más alejados del mar- el isópodo terrestre *Porcellio scaber* (Oniscidae).

En el medio epígeo, la cavernosidad y cavitaciones que posee la roca, formadas básicamente por karstificación de la misma a través de procesos de disolución intergranular, genera microambientes que son utilizados por plantas, vertebrados e invertebrados. Esta utilización de biotopos kársticos por la biota epígea se extiende también a geoformas en zona de penumbra en el interior de abrigos y cavidades más profundas. Las celdas de los boxworks son así utilizadas para la nidificación de aves (Figura 20) y diversas mesocavernas suministran refugio a micromamíferos, como ratones y topillos. Reptiles tales como lagartijas (Lacertidae) son muy frecuentes en estos biotopos rocosos. Hemos encontrado también tritones *Triturus sp.* (Salamandridae), habitando y criando en cubetas mayores alimentadas por hilos de agua semi-permanentes o que se rellenan con las lluvias. Con menor frecuencia también se presenta bajo bloques húmedos, con cobertura vegetal, el lagarto ápodo llamado cristalina o serpiente de cristal *Anguis fragilis* (Anguidae). Especies mayores de mamíferos, tales como zorros y mustélidos, usan como madrigueras galerías y anfructuosidades de la roca en el interior de las mismas.

La vegetación por su parte aprovecha con frecuencia grietas y oquedades, particularmente cubetas y concavidades producto del vaciado de cannonballs, las cuales suministran cierta protección contra la radiación solar y la desecación, constituyendo ambientes húmedos en áreas de roca expuesta (Figura 20). Si el lugar es topográficamente propicio, llega a desarrollarse una capa de suelo vegetal en la cubeta, constituyendo un microhabitat que utilizan especies características.

Los acantilados de arenisca que dan al mar son habitados por grandes colonias de gaviotas, particularmente entre Monpás y Punta Atalaya, y en los paredones de la punta del Faro de La Plata. Se puede decir que estas aves utilizan todo tipo de cornisas y salientes para anidar, o como posadero habitual, y la cavernosidad de la arenisca en zonas de acantilado les suministra excelentes lugares de abrigo, protección y descanso. La presencia de gaviotas y su algarabía es algo característico del litoral de Ulía y contemplar sus evoluciones y planeos en el espacio, con el mar al fondo, constituye todo un espectáculo.



**Figura 17.** Las cuevas de Ulía albergan notables geoformas, de impactantes colores y diseños, a la vez que revisten considerable interés científico, por contener ejemplos únicos característicos de este singular pseudokarst en arenisca. En las imágenes, formas alveolares, boxworks y concreciones diversas.



**Figura 18.** Otros detalles de remanentes de cavidades y geofomas en paredes prácticamente expuestas. Nótese la ocurrencia de concreciones laminares, que probablemente envolvían cannonballs. Poseen un alto contenido en óxidos de Fe y Al.



**Figura 19.** Diversidad de cavidades y geformas en el pseudokarst de Ulía. Nótese el contraste entre la cobertura externa, fuertemente recementada y de monótona coloración gris, y las superficies internas arenizadas por disolución intergranular del cemento carbonático.



**Figura 20.** Pseudokarst de Ulía. Detalles de utilización de biotopos rocosos en geformas de la arenisca por parte de especies de la fauna y flora local. Arriba: muchas pequeñas aves construyen sus nidos en celdas de boxworks. Debajo: Las cubetas de roca son del agrado de muchas plantas amantes de la humedad y la sombra. En el recuadro pequeño: un txatxangorri o petirrojo.

## CONCLUSIONES

El pseudokarst en arenisca del monte Ulía presenta infinidad de cavidades y geoformas, de rasgos comparables a los reportados previamente para el pseudokarst de Jaizkibel e Igueldo, desarrollados en la misma litología (Galán et al, 2009). Tal vez el tramo del litoral de Ulía es el menos propicio de las tres zonas citadas para la formación de cuevas, por el fuerte buzamiento de los estratos, lo que promueve -como en el karst clásico- la escorrentía en detrimento de la infiltración. Pero las prospecciones y los estudios en progreso muestran que existe todo un potencial para sucesivos descubrimientos de interés biológico y geológico. Los ocultos parajes que alberga Ulía reúnen de este modo rasgos de considerable interés científico y de indudable belleza estética.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los compañeros que nos acompañaron en las múltiples exploraciones de campo efectuadas a los litorales de Jaizkibel, Ulía e Igueldo, entre otros: Jose Rivas, Iñigo Herraiz, Carolina Vera Martin, Aize García, Daniel Arrieta y muchos otros colaboradores y amigos. De modo especial a José María Beobide y Loli Nieto Rubia por su colaboración en la obtención de algunas de las fotografías que ilustran esta nota.

## BIBLIOGRAFIA

- 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.
- Colinet, P.; A. Nepomnyashchy & J. Legros. 2002. Multiplication of defects in hexagonal patterns. Europhys. Lett., 57: 480-486.
- 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. 2001. Primeros datos sobre el Medio Subterráneo Superficial y otros habitats subterráneos transicionales en el País Vasco. Munibe Cienc. Nat., 51: 67-78.
- 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. Molia. 2008. ¿Geología o Paleontología? Las concreciones esféricas con perforaciones tubulares: Nuevos ichnotaxa de Paramoudras (Pseudokarst en arenisca del flysch Eoceno, Jaizkibel, Gipuzkoa). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 43 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. & 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). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 10 pp.
- Galán, C. & J. Rivas. 2009. Hallazgo de Proparamoudras en un acantilado del litoral central del monte Ulía (Punta Atalaya, flysch Eoceno de San Sebastián, País Vasco). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 25 pp.
- Galán, C. & C. Vera Martin. 2009. Análisis por espectroscopía Raman de una sección continua de Paramoudra (muestra 4a) en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 12 pp.
- Galán, C. & C. Vera Martin. 2010. Espeleotemas de magnetita, hematita, yeso, ópalo-A y otros minerales secundarios en una cueva del pseudokarst de Jaizkibel: Caracterización por espectroscopía Raman, difracción de rayos X (DRX) y espectrometría por dispersión de energía (EDS). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 16 pp.
- Galán, C. & C. Vera Martin. 2011. Microanálisis por dispersión de energía XPS de espeleotemas de yeso y ópalo-A en una cueva en arenisca de Jaizkibel (País Vasco). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 8 pp.
- Galán, C.; M. Molia; M. Nieto & J. Rivas. 2008. Nuevos datos sobre Paramoudras y concreciones relacionadas en Jaizkibel e Igueldo (Pseudokarst en arenisca del flysch Eoceno, Gipuzkoa). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 44 p.
- 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). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 26 pp.
- Galán, C.; C. Vera Martin & M. Molia. 2009. Análisis por espectroscopía 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 espectroscopía Raman de envolturas (gangas de separación) y tubos de Paramoudras en arenisca de la Formación Jaizkibel. Pag. web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 11 pp.
- 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.
- Mustoe, G. E. 1982. The origin of honeycomb weathering. Geological Society of America, 93:108-115.
- Nagy, I.P. & J.A. Pojman. 1993. Multicomponent convection induced by fronts in the chlorate-sulfite reaction. J. Phys.
- 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.
- Van Den Berg, E. 2009. Imitando la vida: biomorfos. National Geographic, Diciembre 2009, Vol. 25 (6): 12 pp.
- Young, Y. & H. Riecke. 2002. Mean flow in hexagonal convection: stability and nonlinear dynamics. Physica D, 163: 166-183.
- Zaragoza, J. & C. Galán. 2007. Pseudoescorpiones cavernícolas de Gipuzkoa y zonas próximas. Lapiaz, 31: 1-14. + Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 14 pp.