

**NOTAS SOBRE CUEVAS Y GEOFORMAS EN ARENISCA EN LA PUNTA EXTERIOR
DE ELGORRI, ULÍA (FORMACIÓN JAIZKIBEL)**

Notes on sandstone caves and geofoms at the outer point of Elgorri, Ulía (Jaizkibel Formation)



Carlos GALÁN; Marian NIETO & Piero DI BARTOLOMEO.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi. Marzo 2013.

NOTAS SOBRE CUEVAS Y GEOFORMAS EN ARENISCA EN LA PUNTA EXTERIOR DE ELGORRI, ULÍA (FORMACIÓN JAIZKIBEL)

Notes on sandstone caves and geofoms at the outer point of Elgorri, Ulía (Jaizkibel Formation)

Carlos GALÁN; Marian NIETO & Piero DI BARTOLOMEO.

Laboratorio de Bioespeleología. Sociedad de Ciencias Aranzadi.

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Marzo 2013.

RESUMEN

En la punta exterior de Elgorri, situada al Este de cala Murguita (monte Ulía, Gipuzkoa, País Vasco), se presentan interesantes ejemplos de cavidades y geofomas en la arenisca Eocena de la Formación Jaizkibel. Un pequeño arroyo ha tallado un encajado cauce temporal, que desciende abruptamente hacia el mar, limitado por estratos subverticales de arenisca carbonática. Las paredes de arenisca presentan abrigos, cuevas y una multiplicidad de geofomas, producidas por disolución intergranular y erosión normal. En una de las cuevas hay espeleotemas de ópalo-A, yeso, silicatos de aluminio y rodocrosita. La roca-caja presenta concreciones, nódulos y precipitados diversos (de siderita, óxidos de manganeso, óxi-hidróxidos de hierro y silicatos de aluminio). El trabajo describe las cavidades, concreciones y geofomas, ilustrándolas con fotografía digital.

Palabras clave: Karst, Geoespeleología, arenisca carbonática, concreciones, nódulos, geofomas, espeleotemas, turbiditas.

ABSTRACT

In the outer point of Elgorri, located east of Murguita cove (Mount Ulía, Gipuzkoa, Basque Country) are interesting examples of cavities and landforms in the Eocene sandstone of Jaizkibel Formation. A small stream has carved a temporal embedded channel that descends steeply to the sea bounded by subvertical carbonatic sandstone strata. The sandstone walls have shelters, caves and a variety of geofoms, produced by intergranular solution and normal erosion. In one of the caves there are speleothems of opal-A, gypsum, aluminium silicates and rhodochrosite. The parent rock presents concretions, nodules and precipitates various (siderite, oxides of manganese, oxy-hydroxides of iron and aluminium silicates). The paper describes the cavities, concretions and geofoms, illustrating them with digital photography.

Keywords: Karst, Geospeleology, carbonatic sandstone, concretions, nodules, geofoms, speleothems, turbidites.

INTRODUCCION

En la arenisca de la Formación Jaizkibel (de edad Eoceno), y sobre todo en los estratos más gruesos que ocupan la parte superior de la secuencia de turbiditas, se desarrollan cuevas y formas pseudokársticas. El relieve de los afloramientos de arenisca es abrupto y muy intrincado en sus detalles. Cada sucesiva exploración del territorio pone al descubierto nuevos ejemplos de interés geológico y espeleológico. Algunos son similares a otros ejemplos descritos previamente (Galán & Nieto, 2010; Galán et al, 2013) y tal vez estén mejor representados en otras localidades, mientras que otros resultan novedosos en sus rasgos o presentan morfologías y diseños que amplían el rango de variación previamente conocido para tales geofomas.

La diversidad de cavidades y geofomas que encontramos con cada nueva prospección, nos obliga a reinterpretar el conjunto de datos, re-examinando si los nuevos ejemplos quedan explicados con las hipótesis genéticas propuestas previamente, o si por el contrario introducen nuevas evidencias que exigen modificar, ampliar o afinar las mismas, a fin de que queden incluidas todas las variaciones. Desde luego, siempre sugieren interrogantes, y a falta de analítica sobre una mayor variedad de muestras (debida a su vez a la falta de financiamiento para investigaciones sobre el karst y la geodiversidad del territorio), tenemos que contentarnos con datos geomorfológicos comparados (basados sólo en análisis de algunas muestras). Tales datos, dada su naturaleza, si bien permiten establecer con claridad algunos hechos, o cómo actúan algunos procesos, dejan abiertas para otros ejemplos un abanico mayor de posibilidades de caracterización y de hipótesis genéticas.

En esta nota nos limitamos a describir los ejemplos hallados durante prospecciones en esta nueva localidad y, en la medida de lo posible, presentaremos interpretaciones de sus rasgos más sobresalientes, basados en los datos disponibles.

MATERIAL Y METODOS

La localidad que denominamos Punta exterior de Elgorri es de difícil acceso, por su relieve abrupto y vertical. En algunos lugares usamos cuerda para asegurarnos y técnicas de escalada. Otros recorridos, factibles si el terreno no está húmedo, son sin duda expuestos y hay que extremar las precauciones para transitar por ellos. El sector fue explorado en detalle, centrando la toma de datos en las cavidades, concreciones y geoformas más representativas. Las descripciones fueron completadas con fotografía digital, destacando su escala, fisonomía y rasgos geológicos más sobresalientes.

Las identificaciones y caracterizaciones se basan en las propiedades físicas y morfología comparada de las geoformas. Se presentan y discuten algunas interpretaciones.

RESULTADOS

El área de estudio comprende la punta exterior de Elgorri que limita por el NE el entrante de cala Murguita. La punta también es conocida con el topónimo de Elgorri txiki (Figura 1). En este sector varios pequeños arroyos temporales, de corto recorrido, han entallado el relieve a expensas de planos de estratificación de azimut E-W y buzamiento N subvertical.

Se puede decir que Elgorri txiki forma una punta doble, separada por el cauce encajado de un arroyo temporal. Si se avanza en marea baja por la orilla del mar desde cala Murguita hacia el N, se puede acceder, pasando varias puntas con algunas peripecias, hasta el lado N de la punta situada inmediatamente al S de Elgorri txiki, pero no hasta esta última, ya que el corte del terreno es muy vertical y sin orillas. Desde la parte alta el desnivel es de 40 m (Figuras 2 y 3).

El lado S de la punta forma una pared extraplomada, surcada por fisuras subhorizontales ampliadas por disolución (Figura 2). La roca-caja de color amarillo-anaranjado presenta toda su superficie arenizada, por procesos de disolución intergranular, activa en la actualidad, los cuales impiden la meteorización superficial de la arenisca o los crecimientos de films orgánicos de cianobacterias y líquenes que en la mayor parte de los afloramientos otorgan una monótona coloración gris a la roca.

El lado N, entallado por el cauce temporal, tiene una superficie húmeda y gris, con numerosas concavidades semiesféricas producto de la remoción de cannonballs (= concreciones de la misma composición que la arenisca adyacente, pero con mayor cementación carbonatada). En esta pared hay una cavidad interesante por poseer una pequeña circulación hídrica y una diversidad de espeleotemas milimétricas y films orgánicos. Su desarrollo total alcanza 22 m. En la parte alta de este lado N, sobre la cavidad citada, hay otro abrigo o gruta menor, con diversas geoformas sobre sus paredes internas (Figura 4).

El cauce deja al N otra punta de igual altura, pero menos prominente hacia el W. Su flanco N es una lisa pared vertical que cae directamente al mar, sin dejar orillas (Figura 5). La parte alta forma una afilada cresta y el estrato de arenisca presenta arcos de roca, perforaciones, y ventanas que lo atraviesan. Bajo la cresta cimera y una cornisa, la pared Sur extraploma ligeramente. En esta parte, sobre el cauce, hay una serie de abrigos y grutas, que en su interior presentan roca arenizada (Figuras 6 a 8). En estas cavidades y paredes arenizadas se presentan muy diversas geoformas, concreciones, nódulos y bandeados rítmicos de Liesegang (Figuras 8 a 10).

Las geoformas incluyen boxworks y concavidades de cannonballs. Hay además concreciones de distinto tipo. Algunas de ellas son carbonatadas (efervescen en presencia de HCl diluido, pero no sobresalen de las paredes), otras son de naturaleza arcillosa (se podrían caracterizar como lutitas grises), hay también nódulos esféricos de siderita (carbonato de hierro) de colores morados.

En algunos puntos se presentan concreciones negras de óxidos de manganeso (posiblemente de todorokita y/o manganita), pero que también podrían incluir combinaciones con óxidos de hierro (como limonita, hematita). De algunas de estas concreciones difunden soluciones que tiñen la roca de color negro. Estas podrían deberse a la ocurrencia de goethita o de otras soluciones que resultan fuertemente pigmentadas por óxidos o hidróxidos de manganeso (Figura 9).

Se presentan también concreciones, esféricas y en láminas irregulares, de óxidos y silicatos de hierro y aluminio, de ocre a marrones. A partir de ellas también difunden soluciones que pigmentan la roca inmediata con bandeados y anillos de Liesegang de tonalidades rojizas y ocre (Figuras 10 a 14). Encontramos algunos raros ejemplos de concreciones con láminas internas de óxidos de hierro cuya estructura poliédrica (quillas radiales y concéntricas) recuerda al de las septarias (nódulos cuya fracturación interna ha resultado rellena con distintas fases minerales) (Figura 14). Al respecto, las septarias son frecuentes en la parte inferior de la serie del flysch Cretácico de la costa vasca (Formación Deba o Flysch Negro) junto a nódulos y niveles de siderita. En este caso la concreción en sí ha resultado removida, quedando en relieve positivo sus láminas internas.

Resulta interesante destacar que estos rasgos resultan observables en las superficies internas de cavidades, donde la roca-caja está arenizada y desprovista de films de meteorización superficial. En la base de los abrigos y parte basal de concavidades y microrelieves son abundantes los depósitos de arena suelta, producto de la desagregación intergranular de la arenisca.

Adicionalmente hay zonas con precipitados blancos, de consistencia fina y pulverulenta, probablemente de alófano (silicato de aluminio hidratado), según comparación con muestras analizadas de otras localidades de Ulía y Jaizkibel (Figura 9).

La diversidad de concreciones y precipitados de minerales secundarios, por sí misma, confirma la complejidad de procesos de disolución intergranular que ocurren en la roca-caja, con reactividad de soluciones multicomponentes las cuales dan origen a estos precipitados, que a veces ocurren de modo ordenado o serial, como depósitos sucesivos a medida que las soluciones que percolan precipitan sobre la superficie de la arenisca en los abrigos y cavidades.



Figura 1. Localización de la Punta exterior de Elgorri, en el monte Ulía. Ortofoto y topografía digital con aumento progresivo en cada recuadro. Fuente: b5m.gipuzkoa.net.



Figura 2. Punta exterior de Elgorri. Pared extraplomada de 40 m de desnivel en el flanco Sur de la punta Sur, atravesada por fracturas subhorizontales, perpendiculares al estrato vertical. Presenta grandes superficies de roca arenizada.



Figura 3. La doble punta de Elgorri txiki, con la ensenada de cala Murguita y Bajo aundi al fondo. Arriba: el flanco Sur arenizado. Nótese las cavidades del flanco N (flechas rojas) y desprendimientos recientes (flechas naranjas).



Figura 4. La punta Sur de Elgorri desde la cresta de la punta Norte. Nótese sobre la pared las oquedades dejadas por la remoción de cannonballs, una gruta superior y la amplia boca de una cueva subhorizontal e hidrológicamente activa.



Figura 5. El borde de la punta N de Elgorri con Cala Murguita al fondo (arriba) y el flanco N vertical de dicha punta (debajo). Se observa también la punta siguiente (Elgorri aundi) y parte de Jaizkibel en el horizonte. Nótese los recubrimientos de líquenes amarillos y la monótona coloración gris de la arenisca meteorizada en superficie.



Figura 6. El valle entre las dos puntas es recorrido por un cauce temporal. Abrigos y grutas con geoformas en la cresta y flanco Sur de la punta exterior de Elgorri. Nótese la roca arenizada, con perforaciones y ventanas.



Figura 7. Arco de roca, abrigos y geoformas en la cresta de la punta Norte.



Figura 8. Abrigos con geoformas, nódulos, concreciones y precipitados de soluciones minerales que tiñen con distinto colorido la roca arenizada. Se observa también la delgada corteza recementada sobre la superficie externa.



Figura 9. Concreción y precipitados de óxido de manganeso (todorokita y/o manganita) (arriba) y precipitados de hierro y manganeso que difunden sobre la roca arenizada. En la imagen inferior, cerca del borde externo, se aprecia una banda de precipitados blancos de silicatos de aluminio amorfo (alófanos y otras fases minerales).



Figura 10. Abrigos y geformas alveolares. Nótese la franja recementada blanca (imagen superior y detalle). Y nódulos de consistencia arcillosa (lutitas grises, en la imagen inferior), así como depósitos de arena suelta.

En la cueva subhorizontal localizada en el flanco N de la punta S, además de ejemplos similares a los descritos, la parte interna es muy húmeda, ya que la cueva ha sido en parte excavada y es recorrida por un hilo de agua, con pozas y cubetas (Figuras 15 á 18). En estas zonas húmedas hay precipitados de espeleotemas que forman recubrimientos junto a films orgánicos de algas y líquenes. En la superficie exterior son abundantes sobre la roca gris crecimientos de líquenes amarillos y blancos (Figura 32). Pero en la cueva, los recubrimientos orgánicos predominantes son de tapices bacteriales y de algas de colores verdes y negros. Junto a ellos, y posiblemente asociados a los mismos, hay espeleotemas milimétricas de ópalo-A, silicatos de aluminio amorfo, sulfatos y yeso. Hay por último una espeleotema que forma delgados recubrimientos de color rosado, asociado a otros blancos, de efecto estético muy llamativo. Su composición resulta enigmática y hasta el momento desconocida, careciendo de ejemplos comparables de otras localidades (Figuras 16 y 17). Posiblemente esta espeleotema es de rodrosita (carbonato de manganeso, de color rosa) y/u otros minerales criptocristalinos con algo de Mn en su composición. En las fotos con flash, en zona oscura, queda distorsionada la coloración original, mostrando las imágenes tonos rosáceos a blancos. Algunos de estos recubrimientos parecen estar compuestos por diversas fases minerales, junto a otras orgánicas, siendo la rodrosita sólo uno de los minerales presentes.

La identificación de todas las fases minerales parece una tarea difícil y, dada la complejidad observada (con muchos compuestos amorfos y criptocristalinos) sin duda requerirá el empleo de técnicas analíticas ultrafinas.

Si ahora avanzamos, descendiendo por la zona central donde discurre el cauce del pequeño arroyo, la pendiente se torna más abrupta, con escalones verticales. Entre las dos puntas queda un estrato intermedio deprimido, también de arenisca. Los planos de estratificación, con intercalaciones delgadas de lutitas, han sido erosionados formando dos largas cuevas-fosas (Figuras 19 á 25). Las partes abiertas a la superficie (sin techo) se encuentran en parte cubiertas por bloques de colapso, desprendidos del mismo estrato. El fondo de ambas fosas es recorrido por hilos de agua en sentido E-W (desde la parte alta hacia el mar). En las paredes de estas dos cavidades, que superan los 30 m de longitud y 8 m de altura, se presenta roca arenizada, con otras geoformas. Destacan además laminaciones paralelas en la roca-caja (Figura 22) e intercalaciones en la arenisca de bandas de distinta litología (margas), perpendiculares a la estratificación Figuras 19 y 20).

Ya más cerca del nivel del mar, en las partes bajas frecuentemente batidas por salpicaduras del oleaje, la roca se presenta muy meteorizada, con microformas alveolares y otras debidas a la actividad de organismos marinos incrustantes y perforadores (fouling) (Figura 20). A simple vista sólo destaca el alto número de oquedades semiesféricas producto del vaciado de cannonballs (de hasta tamaño métrico), muchas de ellas ampliadas por la erosión marina (Figuras 23 á 25; Figura 32).

La primera cueva-fosa, situada al N, totaliza 55 m de desarrollo y -25 m de desnivel. En planta ocupa una longitud de 40 m, abierta en gran parte a la superficie en forma de fractura amplia (2-3 m de ancho). Como la superficie también está en declive, por cualquier punto que se acceda el desnivel hasta el suelo es de unos 8 m. En la Figura 21 se muestra la boca superior de acceso, al lado de un gran bloque acuñado. La Figura 23 muestra la parte media, donde bajo el suelo de un primer nivel hay otra galería inferior, a unos -15 m con respecto a la superficie en ese punto. En esta zona inferior, que invaden las aguas del mar en marea alta, hay un retículo menor de galerías a expensas de diaclasas (Figura 23, imagen inferior). La segunda cueva-fosa, situada al Sur, tiene unos 30 m en planta y -18 m de desnivel total. La parte inferior está abierta hacia superficie, con tres tramos techados por bloques acuñados. El suelo en este sector es invadido por el agua de mar en las pleamares y conserva pozas de agua salada en marea baja, por lo que hay que avanzar en oposición (Figuras 24 y 25).

Desde esta última cavidad se puede acceder en marea baja (si el mar está en calma) a la base de la punta Sur. Sobre el nivel de marea alta en este sector se desarrolla una compleja cavidad, como producto de la unión de tres abrigos: dos son fajas o cornisas techadas, subhorizontales, y el tercero es una ampliación de una fractura vertical que enlaza ambos, delimitando de este modo un promontorio cúbico o saliente de roca de unos 8 m de lado (Figuras 26 y 27).

Las bóvedas y paredes de estos abrigos, así como el acantilado extraplomado sobre el abrigo superior, conforman extensas superficies de roca arenizada. La diversidad de geoformas sobre estas paredes resulta notable y sus diseños son estéticamente remarcables (Figuras 28 a 31). Hay grandes boxworks de delgados tabiques, concavidades y parte de concreciones carbonatadas en relieve positivo, así como infinidad de formas residuales: restos de quillas de boxworks, prominencias residuales de formas cordadas, suaves superficies arenizadas, y geoformas resultantes de la remoción incompleta de cannonballs. En conjunto destaca su alto número, tamaño y el hecho de cubrir extensas áreas (más de 400 m² en los abrigos y más de 2.000 m² en el conjunto del acantilado (Figuras 26 á 31). Muchas geoformas tienen morfologías originales y el aspecto de conjunto es espectacular.

La diversidad de cavidades y geoformas (incluyendo nódulos, concreciones, espeleotemas y precipitados diversos) es notorio para tratarse de un área tan reducida. Las imágenes que acompañan esta nota ilustran mejor que mil palabras sus principales características. El examen atento de las fotografías permite además apreciar otros rasgos, como todos aquellos debidos al progreso de la erosión marina, que desgasta con preferencia la base de los acantilados y los estratos delgados de rocas blandas (lutitas y margas intercaladas en la serie). Junto a ellos se producen procesos de descompresión mecánica de la roca, con los consiguientes colapsos y desprendimiento de bloques. Procesos estos muy activos que recortan progresivamente el relieve. Sólo en el lapso de un mes, con ocasión de lluvias persistentes y fuerte oleaje, pudimos observar en el entorno de cala Murguita tres grandes puntos con desprendimientos de tramos enteros de las laderas (Figura 3).

La disposición subvertical de los estratos y los colapsos generan un relieve abrupto, que sin duda podríamos calificar de salvaje. No extraña por ello que se trate de un territorio desconocido, salvaje, poco o nada frecuentado por el ser humano pese a su proximidad a la ciudad de San Sebastián, y en el cual existen múltiples parajes ocultos, con geoformas estéticamente remarcables que, a la vez, resultan de gran interés científico.



Figura 11. Abrigos y grutas, con roca arenizada, concreciones y geoformas alveolares (boxworks). Nótese los cannonballs vaciados, laminaciones y depósitos de arena, producto de la desagregación intergranular de la roca (= arenización).



Figura 12. Diversidad de geoformas: boxworks, concreciones, nódulos, y precipitados de óxidos de hierro formando bandeados y anillos de Liesegang. Nótese nódulos carbonatados y efflorescencias blancas probablemente de alófono.



Figura 13. Abrigos y grutas con boxworks, concreciones de siderita, óxidos de hierro y aluminio, y bandeados de Liesegang.



Figura 14. Concreciones carbonatadas (cannonballs, al ras de la pared) y concreciones concéntricas de óxidos de Fe (imagen superior). Láminas y concreciones de óxidos de Fe cuya estructura recuerda a septarias (imagen inferior). En este caso el cuerpo de la concreción ha resultado arenizado quedando sólo las fisuras (quillas radiales y concéntricas) que rellenaban la concreción. Nótese los depósitos de arena suelta, producto de la disgregación de la roca.



Figura 15. Descendiendo por el cauce temporal entre las dos puntas y acceso a cueva colgada en el flanco N de la punta Sur. Se aprecia también el abrigo superior.

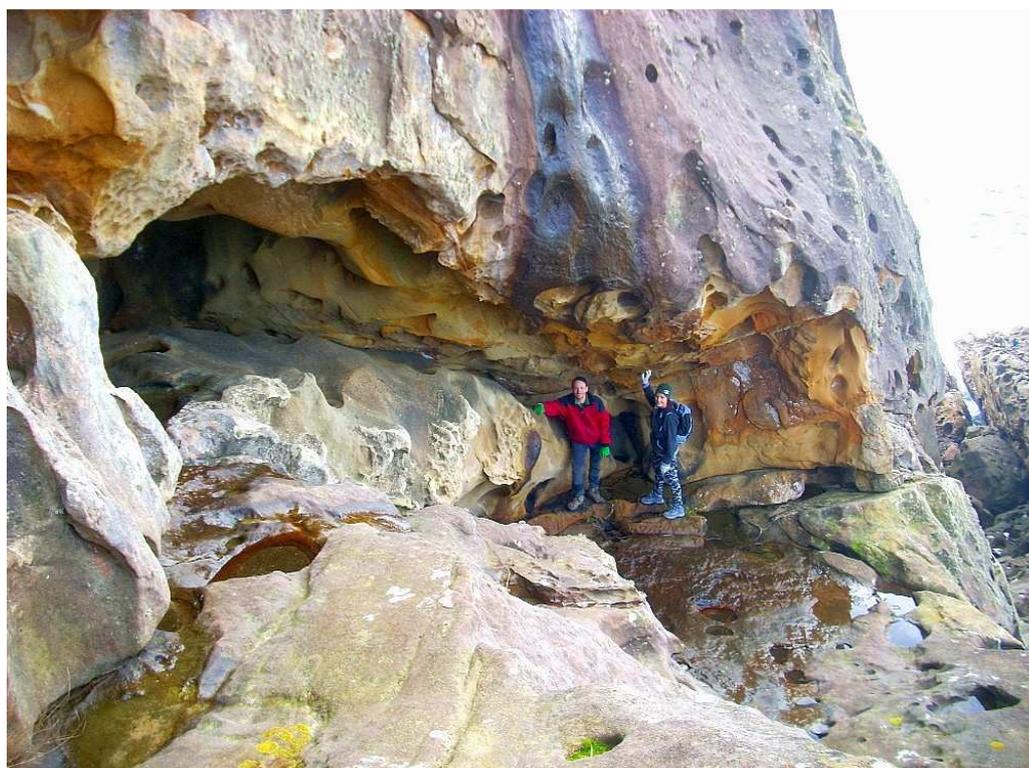
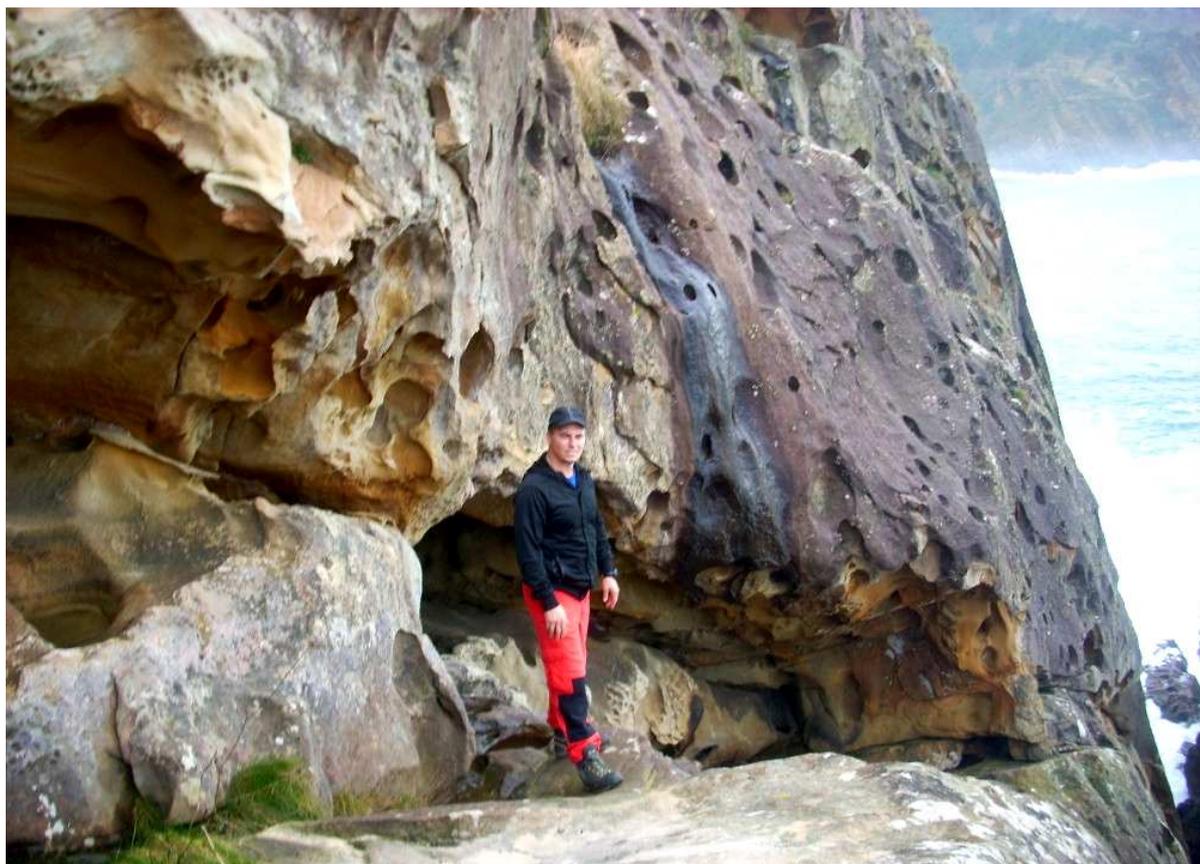


Figura 16. Cueva formada por disolución intergranular y erosión hídrica a lo largo de una fractura. Con geoformas y espeleotemas de ópalo-A, silicatos de Al y probablemente rodocrosita.

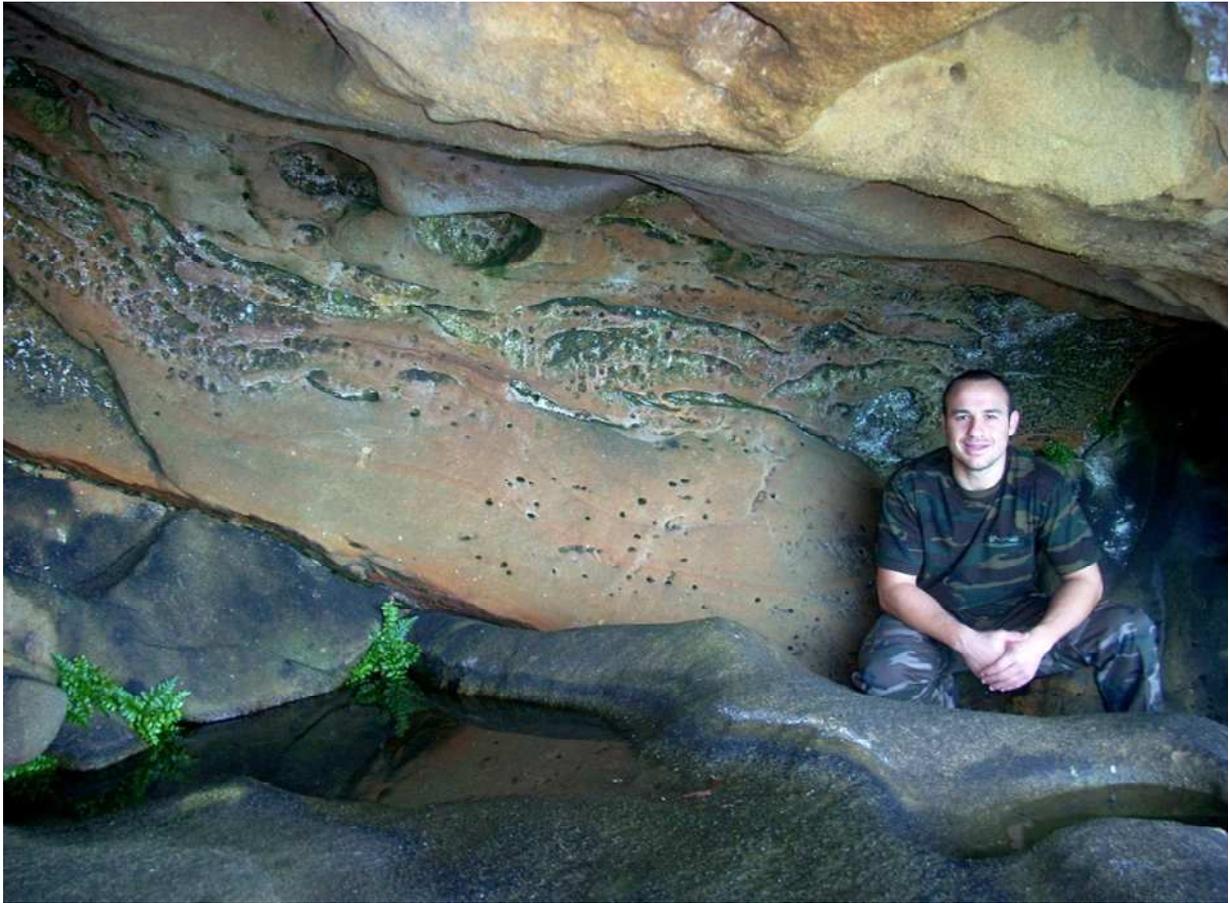


Figura 17. Detalle de pequeña circulación hídrica (arriba). Espeleotemas de alófono y silicatos de Al amorfo, junto a tapices de algas verdes (fila intermedia). Films de probable rodocrosita (fila inferior: la luz del flash distorsiona y aclara el color rosa original). Hay también algunas espeleotemas milimétricas de ópalo-A, yeso, y recubrimientos orgánicos (fila intermedia).

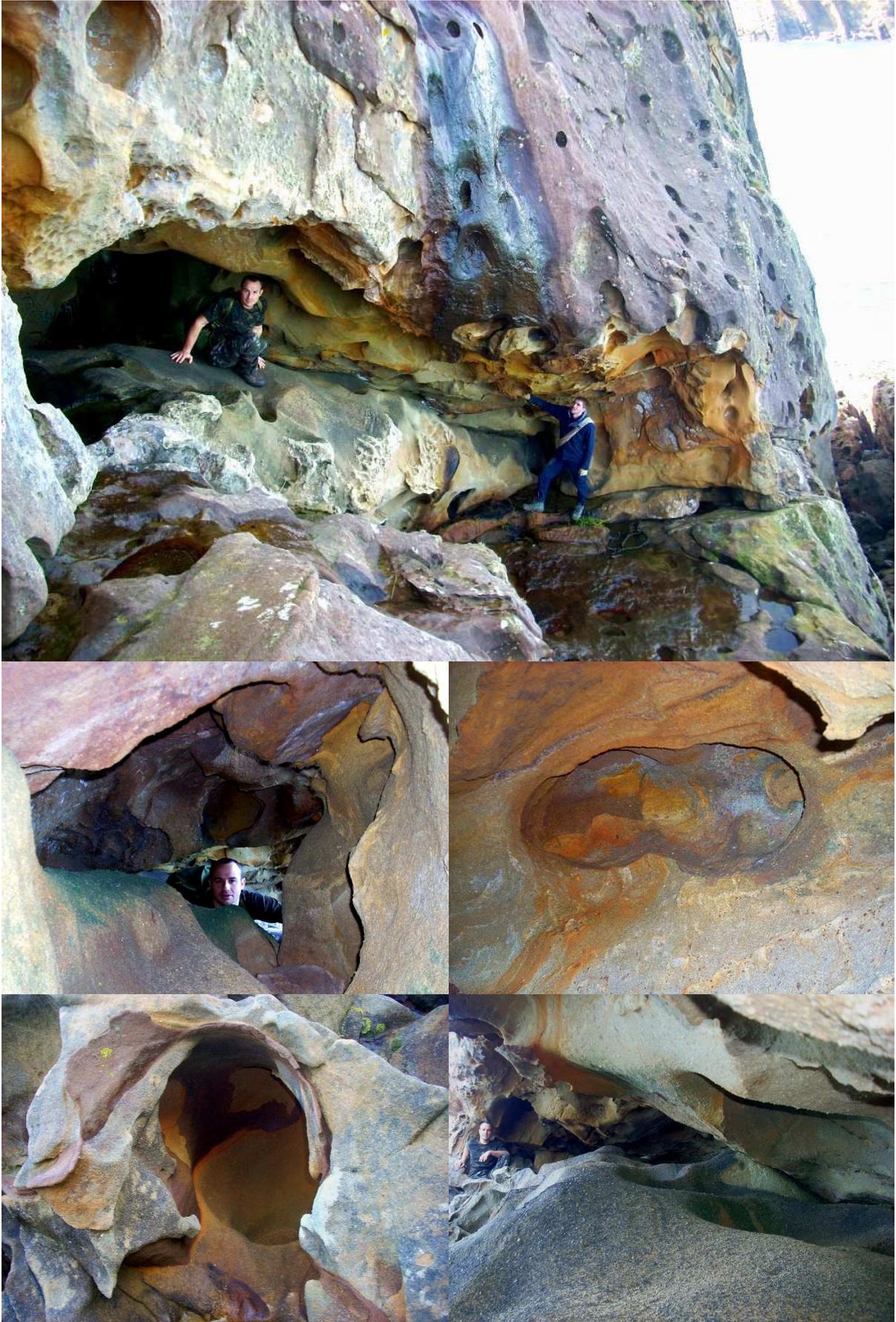


Figura 18. Boca inferior, galería interna y cornisa exterior de la cueva de la punta Sur, con recubrimientos orgánicos de algas, espeleotemas de alófano y silicatos de Al, y diversas geoformas, con concreciones y precipitados minerales de Fe y Mn.



Figura 19. En la parte baja del flanco Sur de la punta Norte se desarrolla una cueva-fosa de más de 40 m de longitud y 8 m de altura. Detalles de geformas en las paredes y vista en vertical hacia los estratos del fondo de la boca superior, con laminaciones paralelas.



Figura 20. Parte inferior abierta a la superficie de la cueva-fosa y pared con geoformas, cruzada por una banda de margas. Nótese el buzamiento subvertical, por lo que las fisuras y la banda margosa intercalada son perpendiculares a la estratificación. Obsérvese también la profusión de microformas alveolares producidas por haloclastia sobre la recementada superficie externa.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las cavidades, concreciones y geoformas encontradas en la punta exterior de Elgorri presentan una geodiversidad notable. Analizando el conjunto de datos expuestos se abren a la reflexión varios interrogantes. En primer lugar destaca desde luego un hecho que se repite en toda la Formación Jaizkibel: que la diversidad de geoformas y de procesos de karstificación alcanza su máxima expresión en tramos con estratos gruesos de arenisca, que son parte de la secuencia de turbiditas abisales.

En estas zonas con estratos gruesos de arenisca son abundantes las concavidades semiesféricas, producto del vaciado de cannonballs (Figura 32). Aparentemente estas concreciones tienen una litología prácticamente igual a la del sustrato de arenisca en que están incluidas, diferenciándose solamente por una mayor cementación carbonatada (Jerez et al, 1971; Campos, 1979).

La inmensa mayoría de estas concreciones ha sido removida, y no se conserva, incluso cuando el declive topográfico es poco pronunciado. Esto sugiere que la mayor cementación carbonatada facilita su completa desagregación por disolución del cemento. Las concreciones, que podrían resultar más resistentes a la erosión de superficie, resultan por el contrario menos resistentes ante la ocurrencia de procesos kársticos de disolución por aguas subterráneas ácidas que percolan a través de la roca. No obstante, hay ejemplos en que se conservan restos de estas concreciones al ras de la superficie de las paredes arenizadas de cuevas (Figuras 12, 14 y 29-31); en estos casos se aprecia que la arenización (y descohesión) afecta por igual a la concreción y a la roca-caja. Lo que nos induce a pensar que deben existir variaciones en la cantidad y composición de los cementos. Los datos petrográficos y análisis de muestras de cannonballs (Jérez et al, 1971) en realidad se han limitado a pocas muestras y son muy escasos. Ha sido supuesto que tales datos representan a todas las concreciones de este tipo, pero parece no ser así. Hoy nos inclinamos a pensar que existen variaciones en la cementación, y por consiguiente en la alteración que origina las geoformas. Para explicar tales variaciones sin duda será necesario analizar un mayor número de muestras, y cuantificar las diferencias entre los distintos casos.

Otro aspecto a considerar es a qué se debe la ocurrencia de tan elevado número de concavidades de cannonballs, tanto en abrigos con roca arenizada como en superficies sin arenizar (Figuras 32 á 34).

Los cannonballs son concreciones esféricas correspondientes a un volumen delimitado de roca sedimentaria en el cual un mineral rellena y cementa los espacios entre los granos del sedimento. Las concreciones se forman en las capas o estratos que ya han sido depositados, en etapas tempranas de su diagénesis, antes de que el resto del sedimento sea litificado. 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. Pero también cualquier impureza o grano mineral puede actuar como núcleo o germen catalizador del proceso (Boles et al., 1985; Chan & Parry, 2002; McBride et al, 2003; Scotchman, 1991). Estas concreciones son conocidas en rocas sedimentarias, típicamente en arenisca, en todo el mundo, y se forman por precipitación selectiva de minerales disueltos en las aguas porales del sedimento, comúnmente carbonato de calcio.

Obviamente, las turbiditas de la Formación Jaizkibel contienen innumerables elementos detríticos (orgánicos e inorgánicos) para actuar como sitios de nucleación que disparen el proceso de concrecionamiento a lo largo de gradientes redox. Pero además, otros factores pueden contribuir a su proliferación. Entre ellos la ocurrencia de emisiones hidrotermales, de sulfuro de hidrógeno y de metano. Estas pueden incluir el ascenso de soluciones calientes lixiviadas desde basaltos bajo el relleno de turbiditas o procedentes de zonas de rifting, tal como las que dan origen a "hot vents" (chimeneas hidrotermales submarinas), y también de "cold seeps" (surgencias o emanaciones frías) de fluidos y gases de metano y sulfuro de hidrógeno (Nelson et al, 2004).

Durante la última década han progresado mucho los estudios de cold seeps en ambientes submarinos modernos en entornos tectónicos y hoy se conocen en todos los océanos del mundo, preferentemente en zonas abisales. En ellos se produce una importante formación de carbonatos asociada a emisiones de hidrocarburos y actividad bacteriana. También se han encontrado depósitos y concreciones de carbonatos autigénicos que han sido interpretados como marcadores de campos de cold seeps fósiles. Algunos de estos depósitos crean formaciones y costras de rocas carbonáticas, así como numerosas concreciones cilíndricas (parecidas a paramoudras), esféricas (como los cannonballs), globulares y anulares. Las concreciones carbonatadas (modernas y fósiles) han sido interpretadas como estructuras de filtración que marcan áreas donde se focaliza el escape desde abajo de fluidos y gases, tales como metano y sulfuro de hidrógeno. Las concreciones carbonáticas son debidas a la precipitación de cementos micríticos y microesparíticos, pudiendo contener calcita, dolomita, ikaita (carbonato de calcio hidratado), rodocrosita, junto a tenores variables de otros elementos (tales como Fe, Mn, Mg) (Aiello et al, 2001; Camoin, 1999; Campbell & Bottjer, 1993; Nelson & Smith, 1996; Nelson et al, 2004; Nyman et al, 2008, 2010; Peckmann et al, 1999; Tasse & Hesse, 1984; Schwartz et al, 2003).

Características isotópicas de los isótopos de C y O indican que la precipitación de calcita en la concreción se produce en la zona de sulfato-reducción a partir de CO₂ derivado del metano, bajo el suelo oceánico, mientras que la precipitación de dolomita se produce a mayor profundidad en el sedimento en la zona de metanogénesis, y es posiblemente más tardía (Nelson & Smith, 1996; Roberts, 2001). La fuente última de C es el CH₄ y/o CO₂ de origen termogénico profundo, o una mezcla de hidrocarburos termogénicos y metano biogénico más somero (Roberts & Aharon, 1994; Roberts, 2001). También parece existir una estrecha relación entre la ocurrencia de concreciones e inestabilidades del talud continental, fallas y cortes en los cañones del margen continental, lo que puede caracterizarse en general como actividad tectónica bajo el relleno sedimentario.

En algunas zonas del suelo oceánico donde se producen emisiones frías de sulfuro de hidrógeno, metano y otros fluidos ricos en hidrocarburos, a menudo se forman depresiones (piscinas de salmuera) con mayor contenido salino. "Cold" no significa que la temperatura de la filtración es más baja que el agua de mar circundante. Por el contrario, su temperatura es a menudo ligeramente



Figura 21. Los estratos deprimidos centrales de la punta exterior de Elgorri y cueva-fosa a lo largo del escarpe Sur de la punta Norte. La flecha roja indica la boca superior (sima de 8 m), representada en la imagen inferior. Pero puede accederse a la cavidad desde distintos puntos, a lo largo de 40 m de longitud, y también desde una fisura inferior paralela.



Figura 22. Detalle de laminaciones y geoformas en la cueva-fosa de 40 m de la punta Norte.



Figura 23. Zona media-inferior de la cueva-fosa de 40 m de longitud. Bajo el bloque empotrado (arriba), se observa un espeleólogo en la base de la fosa abierta de -8 m. Bajo él discurre la galería inferior de la cavidad, tras otro resalto de 6 m, con una galería paralela con charcas de agua (imagen inferior). La cavidad totaliza 55 m de desarrollo y 25 m de desnivel, la mayoría en penumbra.



Figura 24. Acceso a la cueva-fosa de 30 m del lado Sur de la depresión central. Arriba: zona de acceso en la parte superior. Abajo: la cavidad sigue el plano de estratificación desde la boca superior (flecha roja, detalles en los recuadros) y luego bajo tres grandes bloques de colapso (flechas naranja y punto desde el que está tomada la foto). La zona inferior queda inundada durante las pleamares. El fondo de la cavidad discurre a 6-8 m por debajo de donde se encuentran los espeleólogos.



Figura 25. Las dos cuevas-fosa se desarrollan a lo largo de los planos de estratificación a ambos lados del estrato intermedio deprimido (flechas negras). A la cueva-fosa situada al Sur puede accederse también bajo el gran bloque de la imagen inferior. En el techo de la cavidad y bajo el bloque hay espeleotemas de alófono y silicatos de aluminio amorfo (machas blancas).



Figura 26. En la parte basal del extremo W de la punta Sur de Elgorri se desarrolla un curioso abrigo, limitado entre dos fracturas paralelas a la estratificación y dos cornisas subhorizontales. Las paredes y bóvedas, en avanzado estado de arenización, poseen una multiplicidad de concavidades y geoformas, entre ellas boxworks gigantes y formas residuales. Abrigo en la cornisa superior (arriba) con parte de la bóveda del abrigo inferior (debajo). El acantilado tiene 40 m de alto.



Figura 27. El abrigo de unión entre la cornisa superior y la cavidad basal. El conjunto delimita un prominente y curioso espolón cúbico. Con gran diversidad de geofomas sobre las paredes arenizadas internas y bóvedas en extraplomo.



Figura 28. Detalle de geoformas, con concreciones a medio arenizar, grandes boxworks, quillas, aristas, y prominencias menores, en avanzado estado de arenización. Con el aspecto de un fantástico paisaje lunar.



Figura 29. Detalle de las extravagantes geoformas en la pared del abrigo interno.

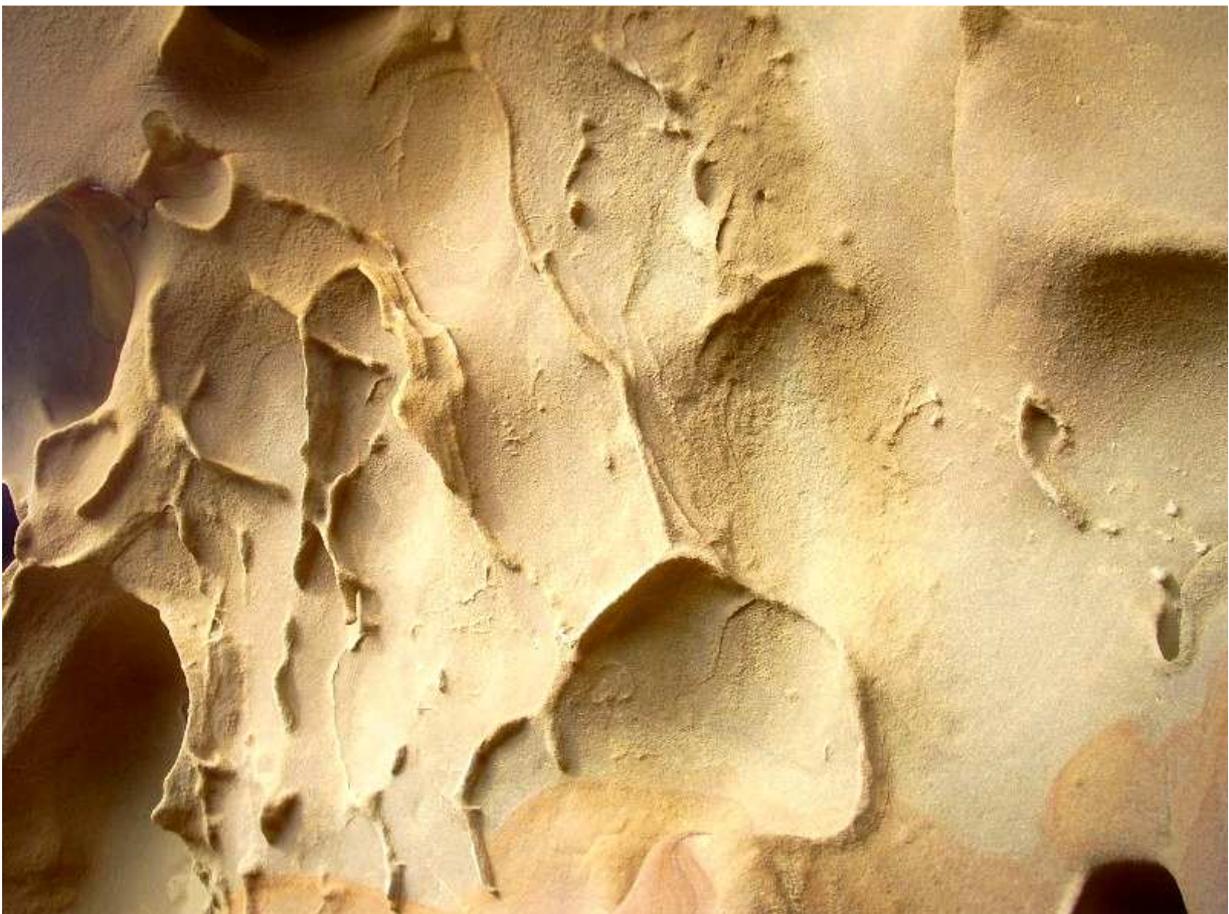


Figura 30. Detalle de geoformas sobre extensas superficies arenizadas, con cannonballs en relieve positivo, boxworks, y geoformas residuales menores. ¿Será acaso en el Sahara, Kalahari, Taklamakán? No, es en una cavidad de un acantilado en el litoral de Ulía (en San Sebastián, País Vasco), con un notable seudokarst en arenisca.

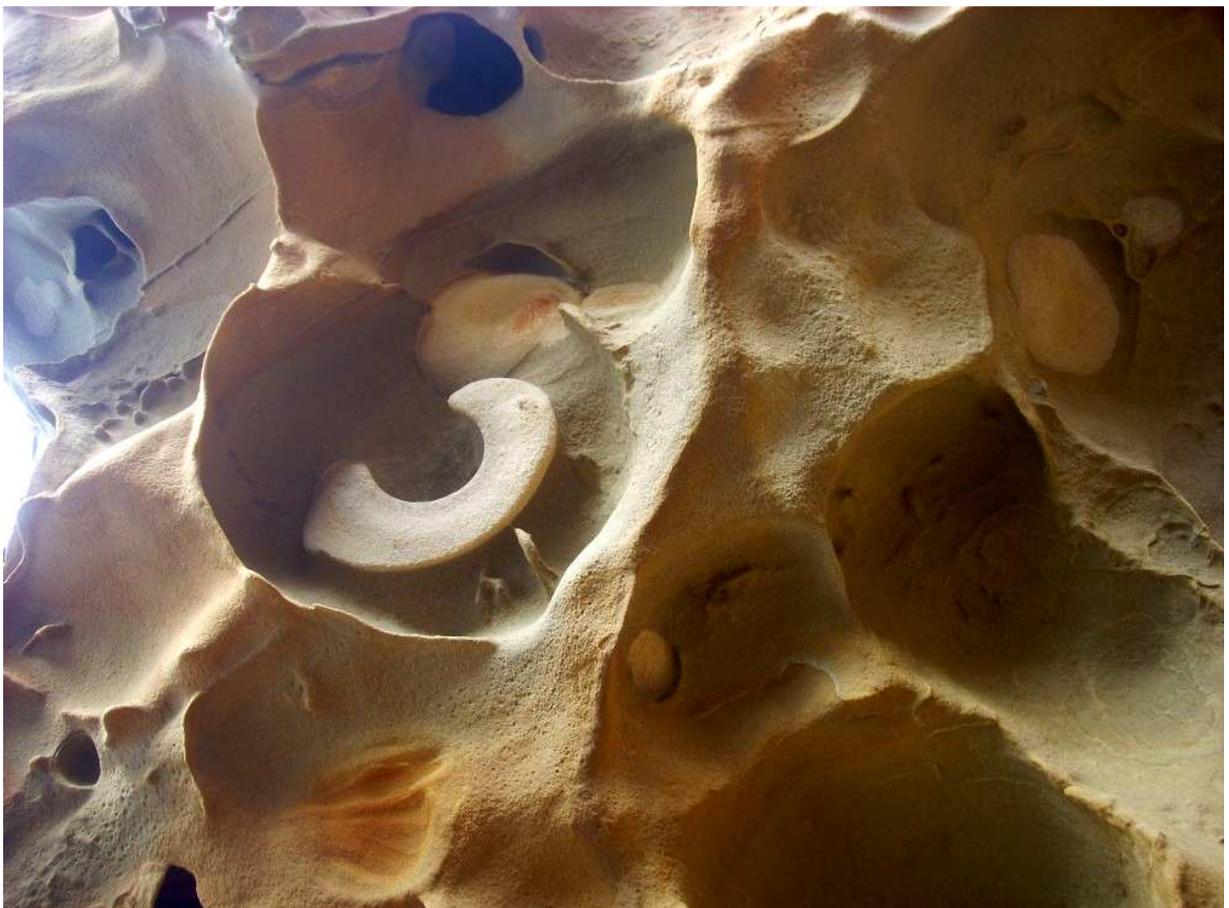


Figura 31. Más detalles de geoformas, por si creían haberlo visto todo. Con diseños espectaculares, únicos en el mundo.



Figura 32. El estrato intermedio, con manchas de líquenes amarillos (arriba) y proliferación de concavidades de cannonballs removidos sobre la pared N de la punta Sur.



Figura 33. La punta exterior de Elgorri alberga un notable conjunto de cavidades y geoformas.



Figura 34. Detalle de geoformas en los abrigos y cavidades de Elgorri, con paredes arenizadas de contrastantes tonalidades amarillas, y diversidad de boxworks, concavidades de concreciones y delicadas laminaciones.

superior, pero se usa el término para diferenciarlas de las emisiones hidrotermales (hot vents o chimeneas submarinas) que son mucho más calientes. Las surgencias frías, así como los hot vents, constituyen un habitat con gran proliferación de formas de vida y especies endémicas de estos ambientes, muchas de las cuales toman su energía directa o indirectamente (por acción de bacterias quimioautótrofas) del sulfuro de hidrógeno y el metano (Camoin, 1999; Sibuet & Olu, 1988).

Las emisiones en sedimentos abisales son altamente heterogéneas. Y sirven de soporte a diferentes procesos geoquímicos y microbiológicos, los cuales se reflejan en un complejo mosaico de biotopos habitados por una mezcla de especialistas heterotróficos, simbioses asociados y fauna del fondo (benthos abisal). Los cold seeps que permiten la existencia de comunidades quimiosintéticas modifican las características geológicas de los sedimentos de su entorno, incluyendo: (1) la precipitación de carbonato autigénico en forma de nódulos, micronódulos, concreciones y masas de roca; (2) la formación de hidratos de gas; (3) la modificación de la composición del sedimento a través de la concentración de restos duros de organismos, tales como fragmentos y niveles de micro-conchas y/o exoesqueletos; (4) la formación de burbujas de gas o hidrocarburos intersticiales; (5) la formación de depresiones o pockmarks por expulsión de gases. Los geólogos tienen distintas hipótesis sobre la procedencia de los fluidos en las emisiones frías. Algunos sostienen que puede deberse a materia orgánica de la lluvia pelágica que queda enterrada sin haber sido completamente oxidada, mientras que otros postulan orígenes más profundos de los fluidos, que también podrían por actividad bacteriana alterar la materia orgánica a medida que ascienden o producir otros fluidos a medida que progresa la compactación y diagénesis de los sedimentos; hay quienes sugieren orígenes mucho más profundos, a partir de materiales contenidos en la corteza o incluso procedentes del manto superior. En lo que existe acuerdo general es en su asociación con cambios en la tectónica de placas, que pueden causar que filtren múltiples fluidos y gases hasta surgir en el fondo oceánico.

En todo caso, la diversidad de los procesos de concrecionamiento genera mucha heterogeneidad mineralógica, incluso en la composición de los cementos, como hemos podido constatar en la analítica de paramoudras (Galan, 2012). La ulterior acción de la karstificación, por el ingreso y circulación de las aguas subterráneas, genera una compleja trama de disolución de los distintos componentes, reactividad química, difusión, convección y precipitación, lo que se traduce en la diversidad de minerales secundarios que estamos encontrando. La arenisca carbonática de las turbiditas de Jaizkibel no sólo contiene granos de cuarzo y una cantidad minoritaria de feldespato y micas, sino que su cemento carbonático puede tener una importante variedad de componentes, de cuya composición química y mineralógica sabemos poco. La disolución intergranular de la arenisca es así un proceso kárstico multicomponente en su química y mineralogía. Los equilibrios de pH y Eh pueden dar lugar a que unos minerales sean disueltos y removidos completamente mientras que otros reaccionan y eventualmente precipitan, a tenor de sus distintas concentraciones y parámetros físico-químicos.

La disolución de los granos de cuarzo es sólo parcial, como lo prueba los múltiples depósitos de arena residual en las cuevas y geoformas. Pero del conjunto de elementos contenidos en la roca-caja, además de carbonatos y sílice, pueden derivarse muchas otras soluciones que pueden generar precipitados de minerales secundarios, procesos en los que a su vez pueden intervenir variables químicas y actividad biológica de microorganismos.

En Elgorri hay ejemplos bastante claros de recementación superficial de la arenisca por carbonatos. Generalmente los abrigos y cavidades en las partes basales de los estratos presentan roca arenizada, en activo proceso de desagregación, posiblemente por tratarse de las zonas de más fácil salida del agua intergranular. Mientras que las caras de estratos y bloques desprendidos más expuestas a insolación o desecación poseen superficies sólidas, no-arenizadas. En algunos ejemplos se puede verificar que el espesor más superficial (de 2-5 cm) está fuertemente recementado por carbonatos, aunque no siempre. Así hay rebordes entre la superficie externa y la roca arenizada del interior de los abrigos que es sólida y resistente, mientras que en otros casos tales rebordes son muy frágiles y quebradizos (poco resistentes) (Figuras 10 a 12). La explicación de esto no es clara.

Nosotros pensamos que bajo condiciones alternas de humectación-desecación puede percolar agua intergranular en todas direcciones del espacio, incluso hacia arriba, recementando las superficies con carbonatos, sobre todo en las partes altas de crestas y bloques (sin cobertura vegetal y edáfica) sometidos a insolación y mayor ventilación. Mientras que en posiciones más bajas, húmedas y menos insoladas esto no ocurre, y la salida del agua intergranular evacúa los carbonatos sin llegar a precipitar o recementar las superficies. Por consiguiente estas zonas resultan luego disgregables ante el avance de la disolución intergranular. En la base de escarpes, zonas con fisuras, y zonas en extraplomo, se ve facilitada la desagregación o arenización de la roca, con la subsiguiente formación de abrigos y cavidades. Algunas de ellas parecen desarrollarse con mayor facilidad a expensas de las concavidades que dejan los grandes cannonballs vaciados (Figura 8), pero no siempre resulta necesaria la ocurrencia de estos (o al menos no hay indicios de que hayan intervenido). También, como en el karst clásico, si parte de la escorrentía se infiltra a través de fisuras y planos de estratificación, la formación de cavidades se ve facilitada. Cuando existen pequeñas circulaciones de agua, aunque sea temporales, estas disuelven la roca y, al crear vacíos o conductos facilitan también la emergencia de aguas intergranulares hacia las mismas. De nuevo, según las concentraciones, puede incrementarse la disolución o dar lugar a la formación de espeleotemas y otros depósitos y precipitados de minerales secundarios.

En las bóvedas y paredes de las cavidades se forman y desarrollan boxworks poligonales, que llegan a alcanzar grandes dimensiones (= boxworks gigantes) (Figuras 13 y 28-31). En su génesis intervienen previamente procesos de difusión y convección multicomponente, los cuales producen los patrones hexagonales y poligonales de mallas recementadas con silicificaciones secundarias. El avance de la disolución intergranular excava las celdas de los boxworks dejando entre ellas delgados tabiques. También deja en relieve positivo muchas láminas y concreciones duras de óxidos y/o silicatos de hierro y aluminio. Los cannonballs pueden resultar también retrabajados del mismo modo, formándose boxworks sobre ellos, antes de su total remoción.

En las superficies arenizadas es posible observar la difusión de sustancias que dan lugar a precipitados coloridos que tiñen la roca con distintos diseños, incluyendo bandeados y anillos de Liesegang. Las soluciones proceden del interior de la roca pero pueden también difundir a partir de nódulos, concreciones y láminas, de distintas composiciones, y discurrir sobre la superficie expuesta de la roca-caja. La diversidad de situaciones y geoformas resultante es alta, con múltiples variaciones y detalles locales.

En Elgorri encontramos algunos ejemplos de que estos procesos de difusión y precipitación de distintas sustancias siguen un orden que puede ser seriado, con depósitos sucesivos de distinta composición química y distinta coloración, formados a partir del mismo flujo (Figura 9). Como si la precipitación de algunos componentes fuera seguida de nuevos equilibrios, en los que se alcanza nuevas condiciones de sobresaturación y precipitación de otros componentes distintos.

En las zonas muy próximas al mar, sometidas a las precipitaciones y salpicaduras del oleaje, ocurren y tienen gran profusión microformas alveolares de intrincados diseños y formas mayores de tipo lapiaz (Figuras 20 y 25). En su génesis probablemente intervienen procesos de haloclastia y erosión marina.

Así encontramos una suma de rasgos complejos, con múltiples gradaciones. Algunos rasgos como las concreciones, nódulos y fisuras rellenas con distintas fases minerales son producidas durante la diagénesis. Mientras que otros como cavidades, boxworks, celdas en panal de abejas, espeleotemas, bandeados rítmicos y precipitados, ocurren bajo el comando de la peculiar karstificación que experimentan los estratos de arenisca. Estos últimos procesos y las geoformas resultantes son activos en la actualidad.

A ello debemos sumar el factor tiempo. Ya que a la erosión normal y marina que recorta y rebaja el relieve, por denudación superficial, se suma la acción subterránea de los procesos kársticos multicomponentes. Así, si bien hay una continua formación y crecimiento de nuevas cavidades y geoformas, a la vez existe una erosión de superficie. Las tasas de erosión en superficie y subterráneas deben haber variado múltiples veces durante los últimos millones de años, con fases alternas de formación de cuevas y geoformas, junto a otras con predominio de la denudación de superficie y destrucción de los sistemas de cuevas. En la fase actual parece predominar la disolución en el endokarst, pero debemos tener en mente que esta trabaja sobre un relieve heredado de fases anteriores, y, por consiguiente, podemos también encontrar vestigios de cuevas y geoformas remanentes de fases pasadas. A menor escala, las diferencias entre años secos y húmedos, y entre periodos de humectación-deseccación en el ciclo anual, pueden agregar más variaciones e introducir complejidad adicional.

También hay que considerar que el nivel marino en la región ha experimentado un ascenso de 90 a 110 m en los últimos 10 mil años. Es por tanto probable que existan cavidades mayores que se encuentran hoy sumergidas bajo el nivel actual del mar, no resultando accesibles. El ciclo kárstico Holoceno no ha dispuesto así de mucho tiempo para excavar cavidades grandes en zona vadosa. A ello se suma el obstáculo mayor que representan las intercalaciones de lutitas y margas, muy disgregables, en el interior de la serie. No obstante, es posible que la investigación diligente pueda descubrir cavidades mayores que las conocidas hasta hoy.

En todo caso, podemos concluir que la geodiversidad e interés científico que presenta el pseudokarst en arenisca de la Formación Jaizkibel es considerable, y que cada sucesiva prospección agrega nuevos datos de interés.

La punta exterior de Elgorri constituye un enclave oculto que, como otros enclaves singulares de Ulía y Jaizkibel, posee todo un conjunto de cavidades, espeleotemas, concreciones y geoformas en arenisca de tipos novedosos para la Ciencia y de rasgos excepcionales, constituyendo probablemente los ejemplos más espectaculares de estos tipos a nivel mundial.

AGRADECIMIENTOS

A todos los compañeros y colaboradores del Departamento de Espeleología de la S.C.Aranzadi que nos acompañaron en los trabajos de campo y/o que nos aportaron útiles recomendaciones, revisiones críticas y sugerencias. De modo especial a Daniel Arrieta Echave, Robert Ionescu, José M. Rivas, Iñigo Herraiz, Carlos Oyarzabal, Carolina Vera Martín, Aize García, Franco Urbani, Brian Recht, Michel Molia, Luis Viera y Olatz Zubizarreta.

BIBLIOGRAFIA

- Aiello, I.W.; Garrison, R.E.; Moore, J.C.; Kastner, M. & D.S. Stakes. 2001. Anatomy and origin of carbonate structures in a Miocene cold-seep field. *Geology* 29: 1111-1114.
- Boles, J.; C. Landis & P. Dale. 1985. The Moeraki Boulders; anatomy of some septarian concretions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55 (3): 398-406.
- Camoin, G.F. Ed. 1999. Microbial mediation in carbonate diagenesis. Special Issue *Sedimentary Geology* 126. Elsevier, Amsterdam.
- Campos, J. 1979. Estudio geológico del Pirineo vasco al W del río Bidasoa. *Munibe, S.C.Aranzadi*, 31(1-2): 3-139.
- Campbell, K.A. & D.J. Bottjer. 1993. Fossil cold seeps. *National Geographic Research and Exploration* 9: 326-343.
- 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.
- Galán, C. 2012. Pseudokarst en arenisca de la Formación Jaizkibel (flysch Eoceno de Gipuzkoa): cavidades, geoformas, espeleotemas, paramoudras, fauna cavernícola. Conferencia dictada en San Sebastián el 22-11-2012 para Exposición sobre el Flysch de la Costa Vasca (Luberri & CPIE-Littoral de la Côte Basque). Audiovisual y web SCA, PDF, 75 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, PDF, 30 pp. + Bol.SEDECK - Soc.Esp.Espeleol. y Cienc. Karst, 8 (2012): 20-41. Reed. modificada.
- Galán, C.; M. Nieto & J. Rivas. 2013. Cuevas y geoformas en Bajo aundi, Ulúa (Pseudokarst en arenisca de la Formación Jaizkibel). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 32 pp.
- Jérez Mir, L.; J. Esnaola & V. Rubio. 1971. Estudio Geológico de la Provincia de Guipúzcoa. Mem. IGME (Inst. Geol. Min. España), Tomo 79, Madrid, 130 pp + Fotograf.
- 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.
- Nelson, C.S. & A.M. Smith. 1996. Stable oxygen and carbon isotope compositional fields for skeletal and diagenetic components in New Zealand Cenozoic nontropical carbonate sediments and limestones: a synthesis and review. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 39: 93-107.
- Nelson, C.; F. Schellenberg; P. King; B. Ricketts; P. Kamp; G. Browne & K. Campbell. 2004. Note on paramoudra-like carbonate concretions in the Urenui Formation, North Taranaki: possible plumbing system for a Late Miocene methane seep field. 2004 Proceedings New Zealand Petroleum Conference, March 2004: 1-5.
- Nyman, S.; Nelson, C.S.; Campbell, K.A.; Francis, D.A.; Hood, S.D. & J. Greinert. 2008. Methane-derived authigenic carbonates (MDACs) in East Coast Basin, New Zealand: Miocene hydrocarbon seep-carbonate systems. Proceedings New Zealand Petroleum Conference. 2008. Lectures.
- Nyman, S.L.; Nelson, C.S. & K.A. Campbell. 2010. Miocene tubular concretions in East Coast Basin, New Zealand: analogue for the subsurface plumbing of cold seeps. *Marine Geology* 272 (1-4), 319-336.
- Peckmann, J.; Thiel, V.; Michalelis, W.; Clari, P.; Gaillard, C.; Martire, L. & J. Rietner. 1999. Cold seep deposits of Beauvoisin (Oxfordian; southeastern France) and Marmorito (Miocene; northern Italy): Microbially induced authigenic carbonates. *International Journal of Earth Sciences* 88: 60-75.
- Roberts, H.H. 2001. Fluid and gas expulsion on the northern Gulf of Mexico continental slope: Mud-prone to mineral-prone responses. *Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union, Vol 124: 145-161.*
- Roberts, H.H. & P. Aharon. 1994. Hydrocarbon-derived carbonate buildups of the northern Gulf of Mexico continental slope: A review of submersible investigations. *GeoMarine Letters* 14: 135-148.
- Schwartz H.; Sample, J.; Weberling, K.D.; Minisini, D. & J.C. Moore. 2003. An ancient linked fluid migration system: cold-seep deposits and sandstone intrusions in the Panoche Hills, California, USA. *Geo-Marine Letters* 23 (3-4):340-350.
- Scotchman, I.C. 1991. The geochemistry of concretions from the Kimmeridge Clay Formation of southern and eastern England. *Sedimentology*, 38: 79-106.
- Sibuet, M. & K. Olu. 1998. Biogeography, biodiversity and fluid dependence of deep-sea cold-seep communities at active and passive margins. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 45 (1-3): 517-567.
- Tasse, N. & R. Hesse. 1984. Origin and Significance of Complex Authigenic Carbonates in Cretaceous Black Shales of the Western Alps. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54 (3): 1012-1027.