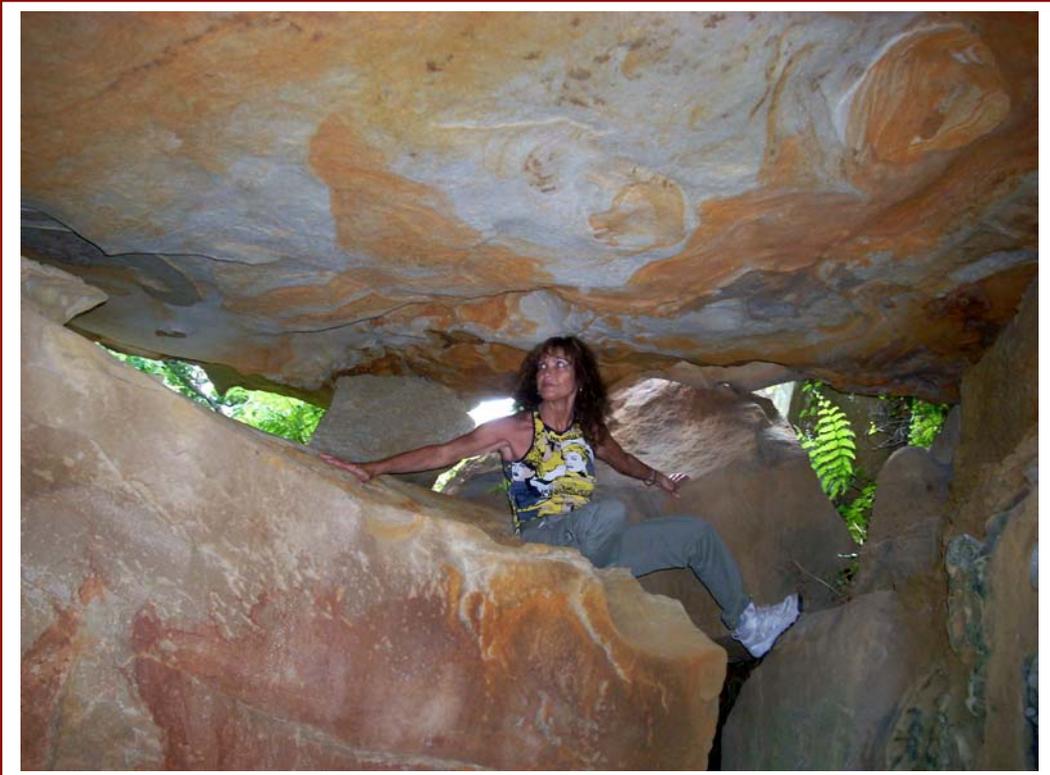


Bandas de Moebius, Boxworks y otras raras Geoformas en arenisca de la Formación Jaizkibel

Moebius tracks, Boxworks and other strange Geoforms in sandstone of the Jaizkibel Formation



Carlos GALAN & Marian NIETO

Sociedad de Ciencias Aranzadi.

Marzo 2010.

BANDAS DE MOEBIUS, BOXWORKS Y OTRAS RARAS GEOFORMAS EN ARENISCA DE LA FORMACIÓN JAIZKIBEL

MOEBIUS TRACKS, BOXWORKS AND OTHER STRANGE GEOFORMS IN SANDSTONE OF THE JAIZKIBEL FORMATION

Carlos GALAN & Marian NIETO

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

E-mail: cegalham@yahoo.es

Marzo 2010.

RESUMEN

Se presentan nuevos datos sobre geofomas extravagantes y paradójicas halladas en abrigos y cuevas en el Pseudokarst en arenisca de la Formación Jaizkibel (de edad Eoceno). Los diseños incluyen raros boxworks, cintas perforadas, bandas de Moebius, formas residuales de disolución, estructuras de corriente, nódulos, láminas e inclusiones ferruginosas, figuras de intercepción y anillos de Liesegang. Raros diseños ocurren en sistemas de cavernas bajo bloques y en escarpes verticales. Las geofomas son generadas por procesos de disolución intergranular, pero intervienen también otros factores, tales como: diferencias litológicas locales, precipitación rítmica y recementación, estructura primaria de las turbiditas abisales, reactividad química, efectos de convección y difusión de ondas-patrón. Las descripciones son ilustradas con fotografías. Se discuten diversos aspectos sobre su origen y características.

Palabras clave: Espeleología física, geología, pseudokarst, cuevas, arenisca, disolución intergranular, geofomas, boxworks.

ABSTRACT

We present new data about strange and paradoxical geofoms found in shelters and caves in a Pseudokarst in sandstone from Jaizkibel Formation (of Eocene age). The designs include odd boxworks, drilled ribbons, Moebius tracks, residual dissolution forms, structures of current, nodules, ferruginous sheets and inclusions, shapes of interference and Liesegang bandings. Bizarre designs occur in cave systems under blocks and in vertical cliffs and escarpments. Geofoms are formed mainly by intergranular dissolution processes. Other factors take part in their origin as well: local lithological differences, rhythmic precipitation and recementation, primary structure of the abyssal turbidites, chemical reactivity, and effects of convection and diffusion of wave-patterns. Descriptions are illustrated by mean of photographs. Several aspects on their origin and characteristics are discussed.

Key words: Physical Speleology, Geology, pseudokarst, caves, sandstone, intergranular dissolution, geofoms, boxworks.

INTRODUCCION

El Pseudokarst de Jaizkibel presenta una gran diversidad de cavidades y geofomas, formadas esencialmente por procesos de disolución intergranular de la arenisca. Una amplia descripción de las formas pseudokársticas fue presentada en una serie de trabajos previos (Galán et al, 2007, 2008, 2009). Las prospecciones y exploraciones subterráneas efectuadas durante el último año han permitido hallar nuevos ejemplos de cavidades y geofomas singulares, a la vez que han permitido apreciar detalles de rasgos no considerados previamente o a los que no habíamos prestado suficiente atención. Simultáneamente, los estudios emprendidos sobre los Paramoudras descubiertos en Jaizkibel en 2008 han conducido a realizar una serie de análisis de caracterización química, mineralógica y estructural mediante técnicas finas, principalmente microscopía y espectroscopía de transmisión de alta resolución (Galán & Molia, 2008; Galán & Vera Martín, 2009; Galán & Oyarzabal, 2009; Galán et al, 2008, 2009, 2010). Los datos obtenidos permiten reconsiderar o precisar de modo paralelo diversos aspectos sobre los probables mecanismos y procesos involucrados en la génesis de las geofomas objeto de este trabajo.

MATERIAL Y METODOS

Se presenta en primer lugar datos descriptivos sobre las cavidades y geofomas halladas, ilustrados con fotografías. Se definen las características y procesos más relevantes que intervienen en su formación. Otras probables interpretaciones son analizadas de modo comparado y por analogía, definiendo con mayor precisión los nuevos ejemplos y describiendo los factores y el orden en que intervienen en la evolución de las geofomas. En último término se discuten las ideas e hipótesis involucradas en su génesis.

RESULTADOS

PSEUDOKARST Y ALTERACION ALVEOLAR EN ARENISCA

La Formación Jaizkibel es una potente secuencia de turbiditas abisales (facies flysch), de edad Eoceno inferior a medio (Mutti, 1985; Campos, 1979). En algunas zonas los bancos de arenisca son más potentes y forman una secuencia casi ininterrumpida de estratos de arenisca; en ellos se desarrolla un pseudokarst, con numerosas cavidades, abrigos y geoformas (Galán et al, 2007). Estos sectores corresponden a tramos que ocuparon probablemente el canal central o algún importante canal distribuidor de abanicos de deyección submarinos (Rosell, 1988; Van Vliet, 1982) y están constituidos por arenas cuarzosas de grano grueso que estuvieron emplazadas en zonas abisales y resultaron cementadas por carbonato de calcio durante su diagénesis (Kempe, 1981).

El pseudokarst de Jaizkibel posee numerosos sistemas de pequeñas cuevas, grutas y abrigos, los cuales albergan notables geoformas (alveolos en panal de abejas, boxworks, formas cordadas, cannonballs y otras concreciones). El término pseudokarst es utilizado para designar afloramientos de rocas tradicionalmente consideradas insolubles, pero que presentan una morfología similar a la del karst clásico en caliza. El drenaje en estas zonas es normal, pero coexiste con áreas que presentan drenaje subterráneo, con la consiguiente disolución de las rocas y formación de cavidades a diversas escalas. La principal diferencia con el karst clásico es que en este caso la disolución procede no sólo a través de fracturas y planos de estratificación, sino fundamentalmente en forma intergranular, atacando el cemento y desagregando los granos de cuarzo (= proceso de arenización) (Urbani, 1986; Galán, 1991; Galán & Lagarde, 1988). El proceso genera cavidades y progresa dando origen a numerosas geoformas en su interior, entre ellas numerosos alveolos y boxworks. A pequeña escala los alveolos pueden también formarse en superficie, pero la proliferación de formas alveolares alcanza su mayor extensión en el interior de las cavidades (Figura 1), aunque algunas son grutas o abrigos muy someros en comparación con el endokarst clásico.



Figura 1. La diversidad de formas alveolares en las cavidades de Jaizkibel es enorme, y va desde pequeños alveolos simples, redes mayores en panal de abejas (= honeycomb cells), y sistemas de grandes celdas u hojaldres (= boxworks), los cuales pueden evolucionar hasta generar formas cordadas. Cuando interceptan nódulos y concreciones se incrementa su diversidad. Escala: Las imágenes superiores cubren 4 m de ancho; las inferiores 6-8 m.

Las formas alveolares sencillas recuerdan a los “tafoni” que presentan las areniscas en zonas áridas o desérticas, sometidas a la acción del viento. La definición de tafoni resulta ambigua o poco precisa, y se presta a confusiones, ya que en la formación de los tafoni a menudo están envueltos factores muy distintos (erosión eólica, deformación mecánica y anisotropía de la roca, hidratación y haloclastia por crecimiento de cristales de yeso y halita, etc.), los cuales no intervienen en las geoformas halladas en Jaizkibel. Por ello preferimos usar el término alteración alveolar (= alveolar weathering).

La formación de cavidades en la arenisca ocurre por disolución intergranular de la matriz carbonática que cementa los granos de arena. Químicamente procede como en la disolución de la caliza, por acción de las aguas meteóricas cargadas de CO₂ y ácidos del suelo. Pero además de actuar a través o a partir de discontinuidades de la roca (diaclasas y planos de estratificación), progresa entre los límites de los cristales individuales de cuarzo, intergranularmente, disolviendo el cemento carbonático.

También puede ser disuelto cierto porcentaje de cuarzo. Aunque la tasa de solubilidad de la sílice es muy baja, lo interesante (como ha sido demostrado para el karst en cuarcita) es que su tasa de disolución es muy baja. Cuando el agua circula intergranularmente esta circulación es muy lenta inicialmente debido a su viscosidad, y el agua puede permanecer subsaturada con respecto a la sustancia sobre cierta distancia sólo si la tasa de disolución es baja. Este es el caso para el cuarzo, pero no para la calcita (Martini, 1982; Galán, 1991). De este modo el cuarzo puede ser disuelto y evacuado en cierto porcentaje.

Los feldespatos y micas, incluidos en la arenisca en cantidades minoritarias, se ven también expuestos a una alteración relativamente rápida, produciendo minerales de la arcilla. Estas fracciones finas son removidas con facilidad. Así, la alteración de otros minerales minoritarios contribuye también a la meteorización de la roca.

Progresivamente se incrementa la porosidad de la roca y la circulación intergranular de agua. Basta con que la disolución progrese hasta descohesionar los granos individuales de cuarzo para que entonces puedan ser removidos volúmenes mayores de roca, formando cavidades. La disolución del cemento carbonático es probada porque el residuo que queda en el suelo de las cuevas es de arena fina, invariablemente. La disolución parcial de la sílice, aunque no ha sido cuantificada, es probada porque también ocurre la reacción inversa de precipitación de sílice secundaria en vetas y geoformas en forma de láminas resistentes. No obstante, el volumen de material removido por disolución afecta a un porcentaje de roca mucho menor que en el karst en caliza, del orden a lo sumo del 10 al 20% del volumen total. Una vez “arenizada” la roca por meteorización química, los granos sueltos son removidos con facilidad por la acción del agua y la gravedad (= erosión mecánica).

Pero nótese que las soluciones saturadas pueden llegar a precipitar y recementar desigualmente partes de la roca. Tanto con cementos carbonáticos como silíceos. Las formas alveolares de gran tamaño, que poseen grandes tabiques delgados separando celdas profundas (denominados en la literatura geológica “boxworks”), usualmente se deben a vetas silicificadas más resistentes que han quedado expuestas al erosionarse la roca caja.

La formación de alveolos y celdas en panel de abejas incluye fases de humectación, durante las cuales el agua penetra entre los poros de la roca y la disolución progresa, y fases de desecación o evaporación de las soluciones intergranulares, las cuales entonces permiten la retracción y formación de mallas de material recementado o no-disuelto; estas redes serán la base para que progrese la creación de tabiques entre celdas. El resultado es que en las paredes de las cuevas, donde emergen las aguas infiltradas, ocurre una alteración diferencial de la roca (= weathering) la cual origina muy diversas geoformas (Figura 2). A continuación serán descritos algunos ejemplos peculiares de Jaizkibel.



Figura 2. Amplio abrigo formado por disolución intergranular en la arenisca, con alveolos y boxworks de distintos tipos y tamaños. Nótese la laminación subhorizontal del estrato. Otros rasgos son debidos a estructuras de corriente (imagen de la derecha) de las turbiditas, las cuales son puestas de manifiesto en la roca arenizada de las paredes.

CINTAS PERFORADAS

Las formas alveolares predominantes en Jaizkibel contienen celdas generalmente poligonales que siguen patrones irregulares. En alveolos de pequeño tamaño son más frecuentes celdas subcirculares. Cuando la estructura es planar, los conjuntos de alveolos adoptan un diseño lineal, que sigue la laminación. Las alineaciones de pequeños alveolos son frecuentes en las paredes de las cuevas y bloques desprendidos, donde forman filas paralelas de alveolos concordantes con la laminación subhorizontal (Figura 3).

Su diseño recuerda a cintas perforadas o cintas troqueladas, similares a las que se utilizaban antiguamente como soporte para el almacenamiento de datos. Tales cintas o tarjetas perforadas tienen el diseño de una tira de papel o tarjeta continua en la que se realizan perforaciones o incisiones en varias filas para almacenar los datos. Fueron muy utilizadas en comunicaciones con teletipos, telares mecánicos, máquinas herramienta tipo CNC, y en los primeros miniordenadores.

Los patrones para cintas perforadas también tuvieron una amplia aplicación en el cifrado de mensajes y claves criptográficas. La criptografía, del griego *krypto* (oculto) y *graphos* (escribir), literalmente significa "escritura oculta" y consiste en el arte de cifrar y descifrar información mediante técnicas especiales utilizadas para permitir un intercambio de mensajes ocultos de modo que sólo puedan ser leídos por las personas a las que van dirigidos y que poseen los medios o claves para descifrarlos. Los textos cifrados o criptogramas contienen en consecuencia información almacenada mediante el cifrado de datos.

Sirva esta pequeña divagación para introducir otro aspecto observado en las geoformas de Jaizkibel. Muchas de ellas evolucionan para formar patrones en relieve positivo (Figura 4). Estos adoptan diseños que recuerdan extrañas escrituras. Pueden recordar a signos de escrituras cuneiformes o a extraños jeroglíficos, pero en todo caso es patente esa similitud o analogía con criptogramas o mensajes ocultos labrados en la roca. Más adelante trataremos con mayor detalle este punto, porque la información contenida en tales "escrituras misteriosas" plantea similitudes con las operaciones (matemáticas) implicadas en cifrados y en mecanismos de formación de patrones naturales por procesos físicos (de reacción y difusión), tales como los propuestos por Turing (1952) y Murray (1981) para sustancias disueltas que reaccionan químicamente, morfogénesis y formación de patrones en tejidos de organismos (Galán, 2010). Aspectos estos que sugieren que el desarrollo de formas y estructuras complejas en la naturaleza (en procesos químicos, geológicos y biológicos) suele estar gobernado por mecanismos relativamente simples.



Figura 3. Diversos ejemplos de alveolos con diseños de cintas perforadas o cintas troqueladas. Aunque algunos bloques están actualmente inclinados, las series de alveolos siguen la laminación subhorizontal original.



Figura 4. Geoformas que recuerdan a cintas troqueladas, formando patrones en relieve positivo. Las geoformas adoptan diseños que recuerdan a extrañas escrituras jeroglíficas. En todo caso es patente su analogía con criptogramas o mensajes ocultos. Su morfología se relaciona con mecanismos de formación de patrones naturales y algoritmos matemáticos usados en procesos de cifrado de datos.

BANDAS DE MOEBIUS

La formación de patrones en forma de cintas o bandas adquiere su más extravagante expresión en las geoformas que hemos denominado informalmente “bandas de Moebius”. Estas se encuentran en paredes de abrigos y cuevas en avanzado estado de arenización. Forman bandas delgadas que destacan de la roca en relieve positivo con un perfil en T: el trazo superior de la T forma una banda separada paralela a la superficie de la pared y el trazo vertical sirve de unión entre la banda y la pared de roca. La banda en sí está perforada por alveolos, sobre todo en sus bordes externos, que resultan recortados por muescas. Las bandas de este tipo pueden tener desarrollos sinuosos, de varios metros, siguiendo la curvatura de las paredes de las cavidades, por lo que en ocasiones recuerdan el desarrollo sin fin de la figura matemática llamada banda de Moebius. Aunque predominan las bandas verticales o que siguen la línea de mayor pendiente, las hay oblicuas y entrelazadas.

La banda o cinta de Moebius (co-descubierta en forma independiente por los matemáticos alemanes August Moebius y Johann Listing, en 1858) es una superficie con una sola cara y un solo borde o componente de contorno. Tiene la propiedad matemática de ser un objeto no orientable. También es una superficie reglada. Puede construirse un modelo tomando una cinta de papel y pegando los extremos en forma cilíndrica tras haber dado media vuelta (giro de 180°) a uno de ellos. La banda de Moebius posee varias propiedades: (1) Tiene sólo una cara: Si se colorea la superficie de una banda de Moebius, comenzando por la aparente cara externa, al final queda coloreada toda la cinta; por tanto, sólo tiene una cara y no tiene sentido hablar de cara interna y cara externa. (2) Tiene un sólo borde: Si se sigue uno de los bordes, al final del recorrido se alcanza el punto de partida tras haber recorrido ambos bordes. (3) Su superficie no es orientable: si se desliza un objeto sobre la banda mirando hacia la derecha, al completar una

vuelta aparecerá mirando hacia la izquierda. (4) Si se corta una cinta de Moebius a lo largo, a diferencia de una cinta normal, no se obtienen dos bandas, sino una banda más larga pero con dos vueltas. Si a ésta banda se la vuelve a cortar a lo largo, se obtienen otras dos bandas entrelazadas pero con vueltas. A medida que se va cortando a lo largo de cada una, se siguen obteniendo más bandas entrelazadas. Ello ha hecho que las bandas de Moebius se utilicen frecuentemente como ejemplo en topología. Diversas obras artísticas se han inspirado en bandas de Moebius, como la película *Moebius* (realizada en Argentina en 1996), la cual hace referencia a la teoría de la cinta del mismo nombre, aplicada a una supuesta red ampliada de subterráneos de la ciudad de Buenos Aires, basada en el cuento de A. Deutsch, 1950, *A subway named Moebius*. Aspectos y caracteres paradójicos análogos los presentan las geofomas halladas en Jaizkibel (Figura 5).

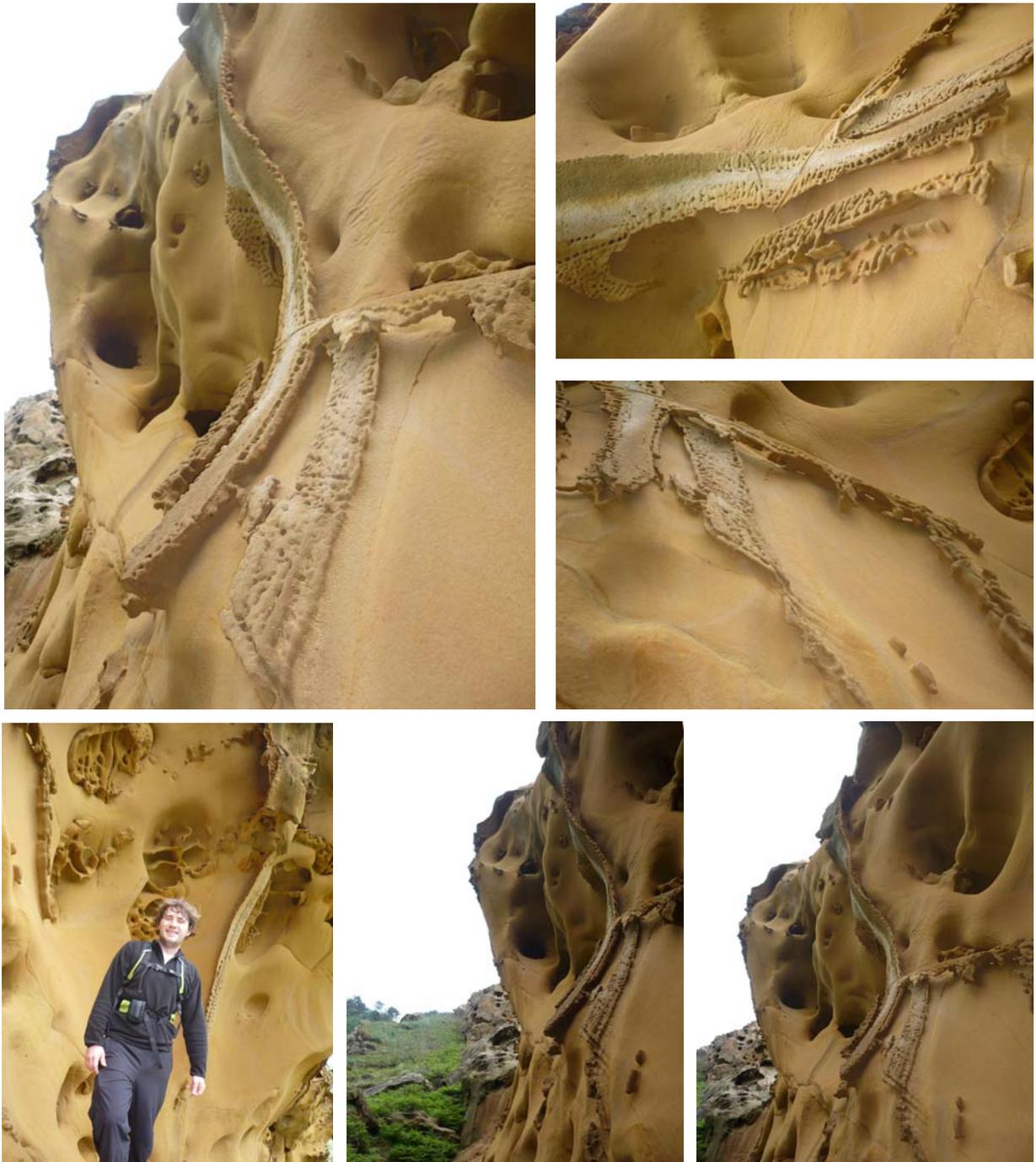


Figura 5. Bandas de Moebius. Nótese sus etéreas y paradójicas estructuras. También se observan geofomas residuales, esculpidas a partir de la alteración intergranular de nódulos y boxworks.

FORMAS RESIDUALES

En muchas cavidades el avance de la disolución intergranular deja residuos o testigos de antiguas geoformas. A ello también contribuye el progresivo rebajamiento del relieve por la erosión de superficie. Las paredes internas, suavizadas, dejan en relieve positivo restos de boxworks y nódulos, a su vez desagregados por formas alveolares. En otros casos los boxworks generan formas cordadas y bandas de Moebius que van quedando separadas de la pared, sobresaliendo en paralelo a ella, hasta quedar en casos extremos unidos solo por delicados puentes de roca. Cuando las geoformas son dismanteladas por completo quedan testigos de los últimos puentes de roca en relieve positivo (Figura 6).

Nótese que algunos casos la alteración afecta a boxworks formados previamente por precipitación de cementos silíceos intergranulares, mientras que en otros casos se ven involucrados cuerpos crecionales formados durante la diagénesis de la arenisca, principalmente cannonballs de cementación carbonática.



Figura 6. Diversidad de formas residuales. En pequeñas cuevas y abrigos (fila superior) quedan testigos de antiguas geoformas, principalmente boxworks y nódulos o concreciones (restantes filas). En la imagen central derecha se aprecia una pequeña parte de una banda de Moebius. Nótese las suaves superficies arenizadas.

CONCRECIONES Y SANDSTONE LOGS

En algunas cavidades de Jaizkibel son frecuentes diversos tipos de concreciones, inclusiones, láminas o vetas, y sandstone logs o concreciones carbonáticas en forma de troncos de madera. En la Figura 7 se muestran diversos ejemplos de inclusiones de lutitas con alto contenido en óxidos y sulfatos de aluminio, glauconita, y óxidos de hierro en forma de vetas y láminas.

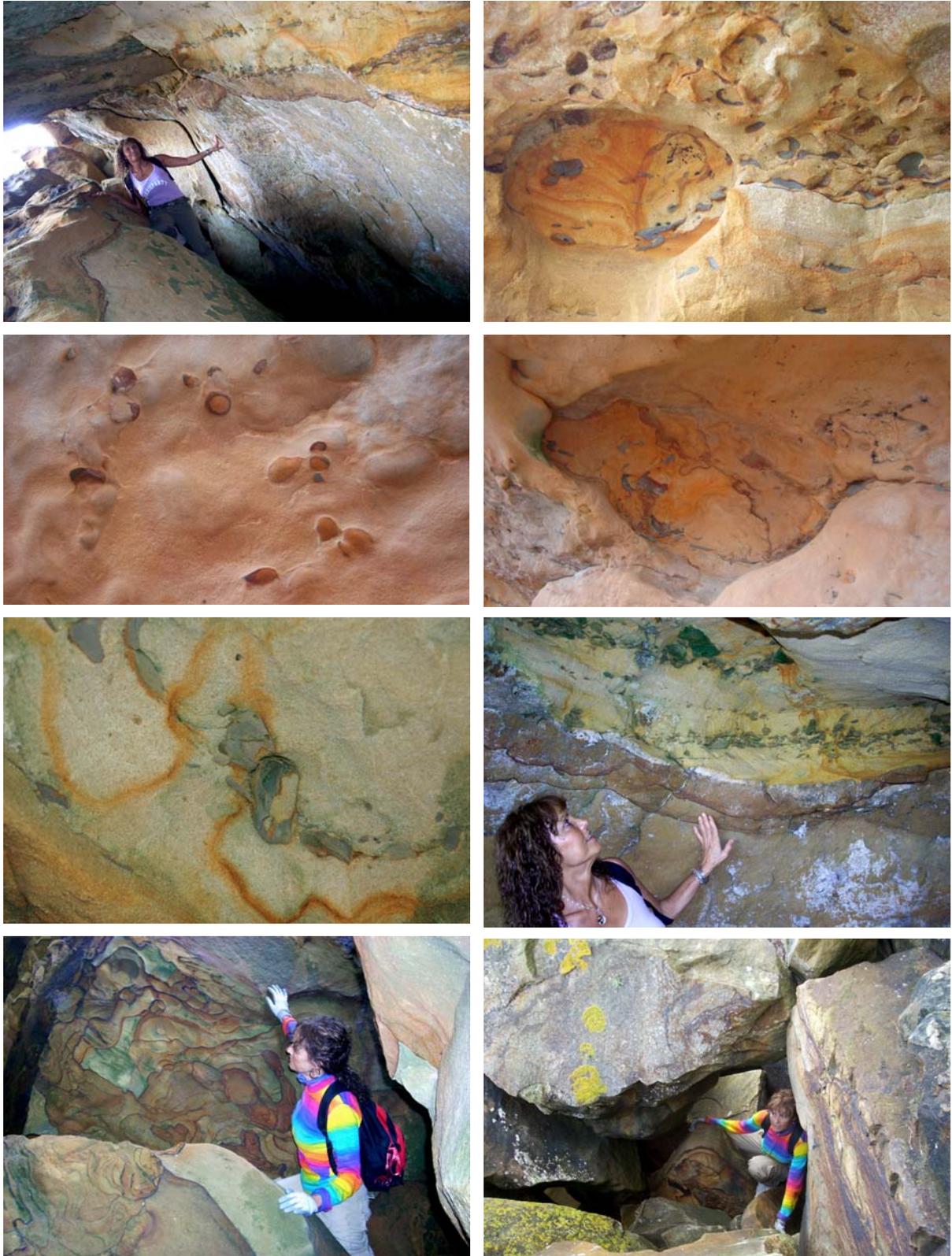


Figura 7. Concreciones, inclusiones y sandstone logs. En la fila superior, cavidad con diversas inclusiones arcillosas, con alto contenido en aluminio. En la fila 2, detalle de otros pequeños nódulos con óxidos de hierro y lutitas. Fila 3: detalle de inclusiones arcillosas con glauconita (colores verdes) y bandeados de oxi-hidróxidos de hierro. En la fila 4 (inferior): vetas irregulares de óxidos de hierro, también presentes en una concreción en forma de tronco de madera (sandstone log), entre bloques clásticos.

ESTRUCTURAS DE CORRIENTE

El distinto colorido de las arenas que forman la arenisca permite apreciar las laminaciones o intervalos más delgados en la sedimentación de cada estrato y diversas estructuras de corriente. Aunque es frecuente la laminación paralela y sinuosa, las corrientes de turbidez formaron también remolinos y circunvoluciones, que generan figuras muy irregulares. En ocasiones, se observan entrelazamientos, divergencias, digitaciones y lóbulos festoneados, debidos a los flujos de alta energía de las corrientes de turbidez. En cambio, las rizaduras de oleaje o ripple marks, frecuentes en playas, son muy escasas o faltan. A veces se presentan intercaladas vetas o láminas ferruginosas que separan en el mismo estrato zonas con distinta orientación y forma de las laminaciones. Otras veces la curvatura de bóvedas y paredes las recorta, generando diseños de intersección. En las figuras 8 y 9 se muestran algunos ejemplos.



Figura 8. En una zona con grandes bloques desprendidos por la fractura de los estratos, existen cuevas de recubrimiento. En ellas se aprecia los distintos colores de la laminación fina en la arenisca. En los bloques que techan corredores y cuevas la intersección de las cúpulas, abovedadas, forma diseños concéntricos. En la fila inferior se muestran imágenes de otra cueva en las cuales se aprecia una lámina o veta de óxidos de hierro que separa tramos del mismo estrato con distinto color y orientación de las estructuras de corriente.

Una amplia referencia sobre las turbiditas de Jaizkibel y sus estructuras de corriente fue presentada en Galán et al. (2008). De igual modo pueden consultarse referencias más extensas (e ilustradas) sobre cannonballs y sandstone logs en: Galán et al. (2007, 2008). Aquí nos interesa destacar detalles que no han sido expuestos previamente.

En la Figura 9 se muestran algunos ejemplos. Entre ellos puede verse: (1) La disposición dendrítica de algunas estructuras de corriente, con diversas anastomosis. (2) Cuando interceptan cannonballs (concreciones esféricas carbonatas), a menudo las atraviesan, experimentando deformaciones adicionales, pero en todo caso el concrecionamiento las posdata. (3) Algunos ejemplos recuerdan a pequeños ripples en las arenas, pero no tienen la forma típica de las rizaduras de oleaje sino formas subrectangulares. (4) Otro ejemplo (en la fila intermedia derecha de la figura 9) muestra claramente una lámina de óxido de hierro separando dos tramos con distinta disposición y orientación de las estructuras de corriente. La lámina debe haberse formado durante la diagénesis de la arenisca y por lo tanto no es un concrecionamiento intergranular reciente (pseudokárstico) sino parte de la estructura primaria. (5) En la fila inferior, un ejemplo de cavidad que conserva pilares estructurales junto a concavidades producto del vaciado de cannonballs. Al respecto, la presencia de concavidades de este tipo, de muy diversas dimensiones (desde 10 á más de 100 cm), es frecuente en los estratos gruesos de arenisca donde se desarrolla el pseudokarst. Por último, en el ángulo inferior, las estructuras de corriente interceptadas en la bóveda relativamente plana de la cueva, muestran bandeados rojizos causados por la precipitación rítmica de fluidos ricos en hierro (anillos o bandas de Liesegang) a partir de las estructuras de corriente que las contienen.

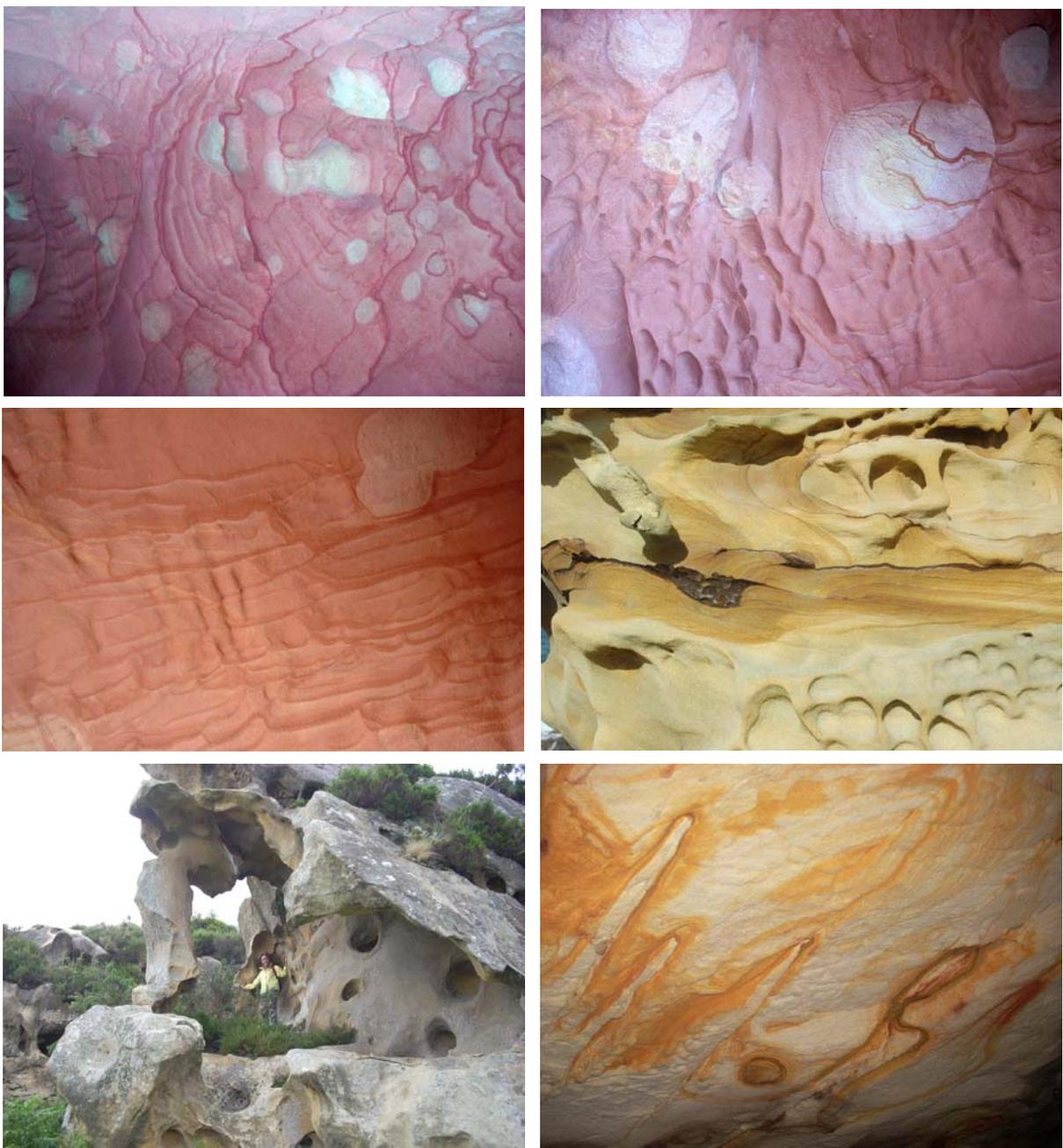


Figura 9. Diversos ejemplos de estructuras de corriente y otras geoformas. Explicación en el texto.

ANILLOS O BANDAS DE LIESEGANG

El Pseudokarst de Jaizkibel presenta una gran diversidad de cavidades y geoformas, formadas esencialmente por procesos de disolución intergranular. Cuando el agua intergranular alcanza la sobresaturación, precipita su excedente en forma de minerales secundarios. Este proceso puede ocurrir al alcanzar la parte aireada de galerías y conductos de cuevas, formando espeleotemas. Pero también puede ocurrir la precipitación de minerales en el interior de la roca, en diaclasas, fracturas y poros que hacen parte del acuífero intergranular. Debido a que la arenisca tiene una porosidad alta, el agua portadora de soluciones de hierro se transmite muy fácilmente entre los poros, sobre todo al avanzar su decementación, además de a través del diaclasado. En las paredes de las cavidades son visibles los precipitados, que forman dibujos. El glosario geológico define a los anillos de Liesegang (= Liesegang rings) como bandas o anillos concéntricos, secundarios, causados por la precipitación rítmica de fluidos saturados en las rocas. Los colores rojos son debidos a óxidos e hidróxidos de hierro. El hierro precipitado obstruye los espacios porosos entre los granos de arena y el agua es forzada a moverse alrededor de los depósitos, formando patrones circulares o paralelos conocidos como bandas o anillos de Liesegang. El hierro puede proceder de superficie o de estratos superiores, pero también de vetas y láminas incluidas en la roca caja. En Jaizkibel son frecuentes depósitos de hierro en torno a cannonballs y en láminas intercaladas en estructuras de corriente. Y a partir de ellos pueden difundir hacia las arenas contiguas. Diversos ejemplos son mostrados en la Figura 10.



Figura 10. Cavidades con curiosos diseños y delicados dibujos de Liesegang formados por difusión a partir de minerales de hierro presentes en otros componentes, como láminas y envolturas de cannonballs.

DIVERSIDAD DE BOXWORKS Y OTRAS CURIOSAS FORMAS ALVEOLARES

Los boxworks constituyen hojaldres o trabajos de encaje, generalmente de grandes dimensiones, con celdas amplias y profundas separadas por tabiques muy delgados. El hecho de que los tabiques resulten resistentes se debe a que están soportados sobre una malla o red de silicificaciones locales, depositada al progresar la disolución intergranular de los granos de cuarzo de la arenisca. Una amplia descripción de ellos fue presentada en trabajos previos (Galán et al, 2007, 2008, 2009). En este apartado haremos referencia a algunos ejemplos de boxworks poco usuales y a su interacción con otras geoformas (Figuras 11 y 12). Pero lo más interesante a destacar es que su ocurrencia prueba que existe una disolución parcial de cuarzo y posterior precipitación de sílice secundaria, así como existe una disolución de minerales de hierro y precipitación posterior de oxi-hidróxidos de hierro en forma de anillos de Liesegang. El progreso de la disolución intergranular, involucrada en la pseudo-karstificación de la arenisca, genera cavidades en cuyas bóvedas y paredes la roca arenizada permite distinguir tales rasgos. Junto a la presencia de muy diversas formas alveolares creadas también por el avance de la disolución. Mientras que en superficie la arenisca muestra una monótona coloración gris, debido a la meteorización superficial y films de cianobacterias, líquenes o vegetación, que impide apreciar tales rasgos.

Notables boxworks y otras curiosas geoformas se presentan en cavidades de difícil acceso, colgadas en escarpes verticales y cornisas que a menudo requieren el uso de técnicas de escalada y jumars para acceder a las mismas. Algunos ejemplos son mostrados a continuación. En la Figura 11 se muestra en la columna izquierda ejemplos de cavidades colgadas y detalles de las técnicas de escalada y speleo utilizadas para acceder a las mismas. En la columna derecha detalles de boxworks y geoformas alveolares que se extienden entre cannonballs o bolas de cañón (concreciones esféricas de cementación carbonatada) en relieve positivo o bien parcialmente rebajadas o vaciadas por avance de la karstificación.



Figura 11. Detalles del acceso a cavidades colgadas con boxworks y otras geoformas. Explicación en el texto.

En la Figura 12 se presentan ejemplos adicionales en otra serie de cavidades. En primer lugar puede apreciarse el amplio extraplomo que dificulta el acceso al primer abrigo en cornisa (puede verse la posición de la cuerda). Este es una franja o faja techada, la cual da acceso a varias cavidades a lo largo de la misma. En ellas y en las paredes del abrigo pueden verse restos de cannonballs y de envolturas ferruginosas en torno a concavidades que los contuvieron, alveolos simples, formas columnares y laminares, y boxworks diversos. La imagen inferior derecha de la figura 12 muestra una serie de boxworks que han sido meteorizados hasta generar una red de geoformas cordadas. Sobre ella, en la fila 2, es visible una especie de espolón gris que forma una incipiente banda de Moebius o banda perforada. Puede apreciarse también la monótona coloración gris que presenta la arenisca en superficie, en fuerte contraste con el colorido de las paredes de abrigos y cuevas.



Figura 12. Abrigos y cavidades en cornisas con diversidad de formas alveolares. En las imágenes de la fila inferior se aprecian boxworks que han evolucionado hasta formar mallas de formas cordadas.

La diversidad de enclaves con cavidades en Jaizkibel es considerable. En algunos valles transversales, perpendiculares a la costa (valles cataclinales), existen grandes escarpes, con tramos de paredes verticales superpuestas, separadas unas de otras por zonas de muy fuerte pendiente cubiertas de vegetación. El desnivel total de estos flancos de valle alcanza 150-200 m. Los tramos individuales de escarpes con paredes de roca verticales (o incluso extraplomadas) alcanzan 20 m. En la base de cada tramo de paredes verticales se forman cornisas y fajas techadas, con abrigos techados que se desarrollan a lo largo de decenas de metros. A lo largo de los mismos, cada tanto, se encuentran grutas y cuevas que profundizan en los estratos de arenisca (Figura 13). Puede apreciarse que la mayor parte de las cavidades se localiza en posición lateral en la base de los estratos de mayor potencia. Es decir, en los puntos en que resulta más fácil la salida del agua intergranular que ha conseguido infiltrarse y permear el estrato.

El recorrido de estas cornisas, cuyo desarrollo total es de varios kilómetros, permite el hallazgo de cavidades de interés, con geformas singulares. Algunas cornisas son fáciles de recorrer, pero a menudo se interrumpen y hay que recurrir a técnicas de escalada o a sucesivos ascensos y descensos, a través de puntos propicios en los flancos, para llegar a ellas. La diversidad de boxworks y formas alveolares en algunas de las cavidades es notable, como veremos a continuación (Figura 13).



Figura 13. Abrupto flanco de un valle cataclinal con escarpes superpuestos. Prácticamente existen abrigos a todo lo largo de las cornisas formadas en la base de cada pared, con numerosas cavidades en ellas. Su recorrido es accidentado. En la fila central, confraternizando con un habitante del lugar, tras un inesperado encuentro. Nótese la gran cantidad de cavidades a lo largo de las aéreas cornisas y colgadas en los escarpes. Sobre las paredes son frecuentes zonas con colores rojos debidos a óxidos de hierro. También se aprecian anillos de Liesegang, diversos boxworks y conjuntos de formas alveolares.

DEPRESIONES CAÓTICAS, CUEVAS DE RECUBRIMIENTO, ESTRUCTURAS DE CORRIENTE Y ANILLOS DE LIESEGANG

En diversos lugares de Jaizkibel existen depresiones y dolinas de hundimiento con su fondo cubierto de grandes bloques. Sobre ellos crece profusamente una intrincada vegetación, por la mayor humedad del lugar. Cabría esperar que su fondo simplemente estuviera cubierto de tierra y bloques menores. Sin embargo, bajo el relleno de bloques, se extienden redes de cuevas de recubrimiento. Sus paredes y techos son grandes bloques de roca y, entre ellos, se desarrollan pasajes y galerías subterráneas en ocasiones de varias decenas de metros de desarrollo. Lo más sorprendente sin embargo es que la roca no está meteorizada. Por el contrario, contiene superficies secas, arenizadas, que muestran en todo su esplendor extravagantes dibujos y diseños de sorprendentes coloridos (Figuras 14 y 15). Algunas de ellas son fragmentos de antiguas cuevas, desmanteladas por el avance de la erosión. A partir del contenido mineral de las estructuras de corriente, pueden formarse bandeados de Liesegang.



Figura 14. Depresiones pseudokársticas con caos de bloques y cuevas de recubrimiento. Sorprende el colorido y los diseños debidos a la coloración primaria de la arenisca, estructuras de corriente y bandeados de Liesegang.

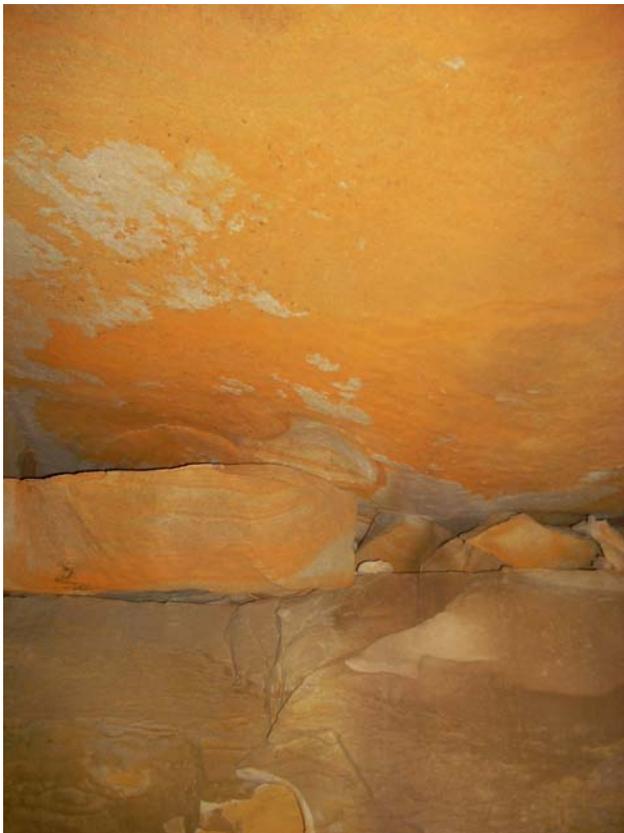


Figura 15. Espectaculares coloridos y diseños de las areniscas en las cuevas de Jaizkibel. Obsérvese el dibujo que parece la cabeza de un osito, en el centro de la zona blanca.

DISOLUCION Y PRECIPITACION

El Pseudokarst de Jaizkibel se desarrolla sobre una serie de potentes bancos de arenisca cuarzosa, de colores claros, en cuya composición los granos de cuarzo constituyen el 90% de la roca, con cantidades minoritarias de feldespatos, micas y glauconita, y cementación de carbonato de calcio (Campos, 1979).

En la topografía actual las zonas de pseudokarst constituyen relieves prominentes, que han resultado más resistentes a la erosión y alteración (= weathering) por las aguas meteóricas que los tramos con mayor proporción de lutitas y margas. Pero en los relieves más compactos de arenisca, la alteración también actúa por meteorización química de los minerales más reactivos y a través de la disolución intergranular de su cemento carbonático. En la superficie de los afloramientos y sobre todo en las zonas más próximas a escarpes, la arenisca, liberada de la presión de los terrenos contiguos, incrementa el proceso de descompresión mecánica y apertura de fracturas, favoreciendo la creación de vías para la infiltración de agua. En adición, la creación de nuevas y numerosas pequeñas grietas aumenta la superficie expuesta a la meteorización química. A partir de la red de fracturas, el agua se infiltra y la disolución se extiende intergranularmente, afectando progresivamente a volúmenes mayores de roca.

Con el progreso de la disolución del cemento carbonático se incrementa la circulación de agua intergranular, exportando el carbonato de calcio. La evaporación en superficie puede hacer que el agua fluya en todas direcciones, donde puede recementar las superficies externas. No obstante, por acción de la gravedad, se verán facilitados los flujos hacia las partes basales de los estratos. La alternancia de fases de humectación con otras de desecación puede producir que la disolución se ralentice o detenga en las fases menos húmedas, permitiendo la precipitación de carbonatos y la formación de redes de material recementado o no disuelto, en el interior de la roca. La desigual distribución del carbonato remanente dará lugar a áreas "duras" y "blandas", con alto y bajo contenido en carbonatos, respectivamente. Si la superficie externa es erosionada, o en ella se forman cavidades, resultan interceptadas áreas de desigual cementación. Las partes blandas se erosionarán más fácilmente que las duras, ampliando las cavidades y dando origen a formas alveolares. Las delicadas estructuras en panal de abejas, con intrincados patrones laberínticos de aristas y celdas, resultan de las diferentes tasas de disolución de las áreas duras y blandas en el interior de la arenisca.

De igual modo, la sílice y los óxidos de hierro, pueden ser disueltos y removidos, así como también pueden precipitar en redes y láminas fuertemente cementadas por sílice secundaria, como en los boxworks, o pueden difundir hacia la arenisca adyacente generando precipitados secundarios de minerales de hierro y anillos de Liesegang. Todos estos rasgos y los debidos a la estructura primaria de la arenisca son puestos de relieve en las cavidades del pseudokarst (Figuras 16, 17 y 18).



Figura 16. Cavidades en las que se aprecia distintos rasgos de las areniscas de Jaizkibel: su coloración, estructuras de corriente, nódulos y concreciones (entre ellas cannonballs), alveolos, honeycomb cells y boxworks.

La diversidad de resultados dependerá también de los componentes de partida. Los rasgos que hoy observamos en la arenisca de Jaizkibel fueron adquiridos en distintas fases: durante su sedimentación unos, otros durante su diagénesis, los hay también adquiridos durante el levantamiento tectónico del terreno y su erosión aérea, y por último, están todos aquellos rasgos debidos a procesos de disolución y precipitación intergranular pasada y actual (pseudokarstificación).

Las estructuras de corriente son formadas durante la sedimentación y emplazamiento de las arenas en la cuenca Eocena. Concreciones silíceas tales como los Paramoudras (Galán et al, 2008, 2009) ocurrieron durante la diagénesis temprana. La cementación carbonática de la arenisca, formación de cannonballs y otros cuerpos crecionales, ocurrió durante la diagénesis de conjunto. Los principales rasgos estructurales (buzamiento, fracturación) son debidos al tectonismo. Las formas del relieve, al progreso de la erosión normal. Sobre todos ellos actúan los procesos de disolución (y precipitación) actuales, desagregando la roca (arenización), dando lugar a distribuciones desiguales del carbonato remanente y a precipitados ferruginosos y silíceos, formando cavidades, generando sobre sus paredes alveolos, boxworks y otras geoformas. Incluso sobre ellas, el avance del proceso de arenización genera formas residuales o incluso las destruye y desmantela por completo, con el consiguiente recorte y rebajamiento del relieve de superficie y la creación de una subsiguiente fase de creación de nuevas cavidades y geoformas (Figuras 17 y 18).



Figura 17. Detalle de geoformas en las paredes internas de cavidades en proceso de arenización. Se observan diversas formas alveolares y boxworks, cannonballs parcialmente desagregados en alveolos, y parte de una incipiente banda de Moebius (en la parte central inferior de la imagen).

La formación de cavidades pone así al descubierto características y rasgos debidos a diferentes factores y formados en distintos momentos. Nuestro interés central se dirige a entender los rasgos del pseudokarst debidos -fundamentalmente- a la disolución intergranular de la arenisca, es decir, a las cavidades y sus geoformas. Pero nótese que algunas peculiaridades que presentan las cavidades se deben al retrabajado de formas preexistentes en la roca, como la distinta alteración alveolar que se produce sobre cannonballs, o la difusión de minerales de hierro y formación de anillos de Liesegang a partir de concreciones y láminas incluidas en la roca-caja. En otros casos, como la formación de boxworks, ha existido una sucesión de fases: la disolución y precipitación parcial de sílice secundaria en el interior de los poros, que resulta entonces desigualmente distribuida, la formación de cavidades y su progresiva ampliación, la arenización de las paredes con desigual formación de boxworks, e incluso su progresiva alteración para generar geoformas cordadas, y su desmantelamiento final mientras progresa la creación de nuevas formas alveolares sobre las nuevas superficies de las paredes. De modo análogo, muchas cavidades, tras su formación, resultan progresivamente destruidas, quedando como testigos en paredes prácticamente expuestas, con sólo pequeñas viseras de techo o rebordes protectores. Algunos rasgos hoy observables prácticamente en superficie corresponden así a remanentes erosionales de antiguas cavidades. También quedan restos de cavidades anteriores entre rellenos de bloques clásticos colapsados.



Figura 18. Impactante colorido de las cavidades de Jaizkibel y sus geoformas. Nótese la laminación subhorizontal recortada por las bóvedas, concavidades producto del vaciado de cannonballs, distintos alveolos, boxworks, y aparente mayor cementación carbonatada de las superficies externas, mientras en el interior de las cavidades la roca-caja está arenizada.

GRADIENTES, FORMACION DE ESTRUCTURAS Y PATRONES COMPLEJOS

La formación de estructuras en patrones geométricos es relativamente común en la naturaleza. Formas esféricas, tubulares, helicoidales, hexagonales o poligonales son comunes en medios orgánicos e inorgánicos.

En nuestro caso, entre las geoformas de Jaizkibel encontramos diversas formas sencillas y otras de mayor complejidad en su diseño. Generalmente en su formación están involucrados gradientes químicos. El más simple de ellos es el que da origen a concreciones esféricas como los cannonballs y otros nódulos esféricos. En este caso el gradiente químico que genera el concrecionamiento esférico parte de un punto y se extiende en forma concéntrica. En formas tubulares, como Paramoudras y sandstone logs, el concrecionamiento sigue también un gradiente radial que se extiende a partir de un eje central longitudinal. El tipo de gradiente radial sugiere una intensidad similar en todas las direcciones del espacio de los valores de equilibrio que determinan la precipitación o no de las sustancias disueltas en las aguas porales.

En las formas alveolares circulares, producidas por disolución intergranular, la forma circular de las celdas sigue un patrón más complejo en la distribución de los alveolos. Ha sido indicado que previamente, en el interior de la roca, ha existido un proceso diferencial de remoción del carbonato disuelto, con irregular distribución del carbonato remanente, de forma que quedan áreas duras y blandas, distintamente cementadas. Las redes homogéneas o simétricas de pequeños alveolos indican una homogeneidad de la roca sobre áreas pequeñas. A medida que las áreas son mayores, o el tamaño de las celdas se incrementa, las formas alveolares resultan mucho más heterogéneas, lo que sugiere un efecto de campo: tanto porque la roca pierde su homogeneidad al aumentar el tamaño de campo como porque se inhomogeneiza la remoción por disolución. Muchos factores pueden influir en ello: posición y tiempo de residencia del agua en las distintas partes del acuífero, mayor o menor velocidad de evacuación de las soluciones, heterogeneidad litológica, etc. En todo caso, los alveolos circulares tienden a formas celdas en panal de abejas y formas poligonales que se asemejan a boxworks, existiendo formas intermedias (Figuras 19 y 20).

Las redes poligonales en medios orgánicos generalmente son generadas por los organismos en respuesta a factores de economía de energía en su ecología y metabolismo. Así las más comunes formas hexagonales (y también poligonales) que emplean las abejas y avispas en la construcción de las celdas que constituyen sus panales, se rigen porque la forma hexagonal es la más económica para construir estructuras resistentes empleando la menor cantidad de materiales. Pero también ocurren en medios inorgánicos, siendo por ejemplo muy conocidos los llamados suelos poligonales, que ocurren con frecuencia en suelos arcillosos de cuevas y en lagunas temporales de superficie sometidas a humectación y desecación periódicas. La pérdida de agua en el sedimento lleva a su retracción y formación de redes de grietas con diseños poligonales.

En el caso de los boxworks probablemente influye un proceso análogo, donde al perderse parte del agua por evaporación, se produce una retracción que precipita el exceso de sílice en redes poligonales. Luego, al progresar la karstificación, estas mallas de material recementado por sílice secundaria, generan el patrón poligonal de los boxworks.

En algunos casos han sido descritos como boxworks o Liesegang rings precipitados de hierro en arenisca. Algunos de ellos también recuerdan extrañas escrituras o han sido considerados como mapas hechos por los indios en tiempos antiguos (varios ejemplos en la Figura 19). En Jaizkibel tenemos algunos ejemplos de este tipo que hemos descrito como cubetas con doble quilla (Galán et al. 2007). En estos casos su formación sigue otro modelo. Tales "boxworks" se generan sobre fracturas planares ortogonales, perpendiculares a la estratificación; los fluidos portadores de los agentes cementantes pasan a través de las fracturas; el cemento extra, óxido de hierro en estos casos, es depositado intergranularmente en los poros de la arenisca inmediatamente adyacente a las fracturas. La arenisca en los espacios rectangulares entre fracturas carece de este cemento extra y permanece relativamente blando, alterándose más fácilmente cuando la meteorización progresa. El resultado son mallas de celdas separadas por tabiques o quillas dobles (Figura 19), donde la grieta central de los tabiques corresponde a la red de fracturas original. Por difusión y precipitación rítmica (como en anillos de Liesegang) pueden formarse figuras concéntricas cementadas por óxidos e hidróxidos de hierro.



Figura 19. Precipitados de hierro o "boxworks" formados sobre redes ortogonales de fracturas. La cementación de la arenisca adyacente a las fracturas forma tabiques con doble quilla que luego resultan más resistentes a la alteración. Izquierda: ejemplos de Jaizkibel. Centro y derecha: ejemplos de Chattanooga (Tennessee) que durante un tiempo se creyó obra de los Cherokee. Nótese en estos últimos que algunos rectángulos incluyen anillos de Liesegang internos de óxidos e hidróxidos de hierro.



Figura 20. Espectaculares ejemplos de boxworks en una cavidad de Jaizkibel. Nótese la evolución hacia tabiques más delgados (de derecha a izquierda) y generación de formas cordadas, separadas progresivamente de la pared al perforarse y destruirse la parte basal de los tabiques, por avance del proceso de arenización. Puede verse también que una lámina de óxidos de hierro separa el tramo superior, donde la arenisca presenta colores anaranjados. En distintos puntos ocurren alveolos menores, los cuales gradan desde celdas subcirculares a poligonales.

La Figura 20 describe mejor que mil palabras la diversidad de formas de los boxworks y las distintas fases del proceso de arenización, que deja residuos de arena en la parte basal de las celdas y en el suelo de la cavidad. Las celdas son generalmente hexagonales o pentagonales, pero las hay triangulares e irregulares. Ello sólo prueba la anisotropía o heterogeneidad en la cementación de la roca. La red de tabiques está soportada por silicificaciones pero el conjunto incluye cementación carbonatada. Parece existir un gradiente en la cementación que va de mayor a menor desde el plano central de los tabiques hacia el espacio ocupado por las celdas.

Resulta interesante destacar aquí que la complejidad se incrementa cuando el agua intergranular lleva en solución no sólo una única sustancia, sino un conjunto de ellas (soluciones silíceas, carbonatos, minerales de hierro, etc.), de modo que conforma un sistema químico. También cabe apreciar que los boxworks en el interior de las cavidades son perpendiculares a las paredes y bóvedas, no a la estratificación, y las superficies no son paredes planas sino generalmente curvas o abovedadas, por lo que influye también la forma en que la malla recementada intercepta las superficies, introduciendo mayor irregularidad.

Un sistema químico que contiene dos o más sustancias disueltas en agua puede reaccionar espontáneamente para formar patrones y estructuras, como las bandas y los anillos concéntricos de Liesegang formados por precipitación rítmica. El proceso es impulsado por mecanismos de disipación de energía química, que a menudo forman gradientes.

En biología de organismos, la adquisición de la forma de un órgano o elemento del cuerpo, en el conjunto del organismo, es denominada morfogénesis. La morfogénesis y la diferenciación de tejidos, juntas, determinan la estructura, mientras que los factores que gobiernan la morfogénesis determinan la forma y tamaño del elemento. Los sistemas naturales, formados por subsistemas repetibles o reproducibles, muestran tendencias gobernadas por las leyes de la termodinámica, y en ellos existe una asimetría esencial entre los cambios inducidos por perturbaciones imprevisibles desde dentro del sistema y los cambios asociados a procesos de autoorganización. Visiones distintas sobre procesos similares a menudo han producido desacuerdos porque los investigadores, simplemente, miran al elefante desde extremos opuestos (Margalef, 1986).

Entre los más importantes factores en la evolución zoológica están aquellos que determinan el número y arreglo espacial de las estructuras. Estos patrones implican mecanismos por medio de los cuales la diferenciación y morfogénesis ocurren en ciertos lugares más que en otros. Muy pronto en la historia de la embriología experimental fue desarrollado el concepto de gradientes de sustancias inductoras, donde determinados caracteres se desarrollan en respuesta a concentraciones sucesivamente más bajas de algunas sustancias. Así las células que están diferenciándose ganan información posicional del gradiente de concentración, y se

diferencian en base a su posición en el sistema. Los cambios en patrones se producen entonces a través de cambios en las respuestas celulares a su posición. Alternativamente, los cambios pueden ocurrir por alteración del gradiente de concentración. En este caso, la sustancia inductora forma un prepatrón, del cual el patrón último de las estructuras es una respuesta.

En forma análoga, en una solución que contiene un sistema químico reactivo, la precipitación de minerales puede ser disparada en respuesta a concentraciones sucesivamente más altas de unas sustancias con respecto a otras, a lo largo de gradientes, que resultan a su vez modificados tras las primeras reacciones. Las primeras reacciones pueden actuar como inductoras de sucesivas reacciones de otros componentes, dando lugar a una concatenación de eventos. Este dinamismo químico explica la asimetría implicada tanto en los procesos de disolución como en los de precipitación. Su resultado será finalmente expresado en la morfología resultante. Pero obsérvese que son procesos dinámicos, que evolucionan a lo largo del tiempo.



Figura 21. Caverna de Jaizkibel con formas alveolares y bandas de Liesegang. Ancho de la imagen: 4 m. Las formas subcirculares del lado derecho corresponden a envolturas con minerales de hierro en torno a cannonballs vaciados.

Algunos patrones complejos pueden, teóricamente, ser generados simplemente. El matemático Alan Turing (1952) mostró que si dos sustancias que reaccionan, para dar una sustancia inductora, se difunden a través de un área (o "campo"), la reacción puede generar una onda patrón en la concentración del inductor. El patrón dependerá del tamaño y forma del campo, de las tasas de difusión de los precursores, y de la cinética de su reacción. Cambios en el arreglo de la onda patrón o en la concentración total del inductor pueden entonces cambiar el patrón de las estructuras que se desarrollan en respuesta al inductor (Galán, 2010).

Más relacionados con los patrones de coloración de Liesegang, observados en la arenisca de Jaizkibel, están los patrones de coloración que a menudo se presentan en muy diversos animales, tales como moteados, manchas y rayas, en p.ej. jaguares, tigres, jirafas, cebras y otros mamíferos. La teoría de Turing fue extendida matemáticamente por Murray (1981) a un modelo de coloración en los mamíferos. Suponiendo que la melanina sea formada por una reacción química de la clase propuesta por Turing, Murray predice que debería desarrollarse una pigmentación uniforme tanto si el campo fuera muy pequeño o muy grande, como si el prepatrón fuera formado muy pronto o muy tarde en su desarrollo. Por encima de un tamaño de campo mínimo, se desarrolla un patrón unidimensional de rayas; a medida que el tamaño de campo se incrementa, emergerá un patrón bidimensional de motas. Así, sobre una superficie con forma cilíndrica, tal como una pata o una cola, las manchas o motas podrán desarrollarse en la extensa área basal, más gruesa, pero sólo se desarrollarán bandas cerca del extremo, más delgado, patrón éste que es observado en la coloración de muchos mamíferos. La teoría de Murray sugiere que no pueden existir mamíferos a rayas con colas moteadas.

En la arenisca de Jaizkibel muchos diseños son observables en cuevas, donde las superficies son formas curvas, abovedadas, y con variables tamaños de campo. El resultado de la difusión o de la precipitación rítmica, como en anillos de Liesegang (Figura 21), dará lugar a diseños complejos, por demás variables, no sólo porque dependen de la posición y forma de los elementos de origen sino por la extraordinaria variabilidad de los campos involucrados. Similar inferencia permite extender la heterogeneidad en coloración a la heterogeneidad en el diseño de formas.

DIFUSION, CONVECCION Y PATRONES BÉNARD-MARANGONI

Los patrones de celdas poligonales y bandas de coloración del Pseudokarst de Jaizkibel, aunque a escala diferente, almacenan información análoga a la de patrones en otros medios. Por lo que resulta de interés ofrecer información sobre los factores que rigen su formación. Los más sencillos, probablemente, son los debidos a efectos de Bénard-Marangoni y diversos tipos de convección.

La formación de patrones por reactividad química, difusión y convección, son frecuentes en la naturaleza. Una amplia variedad de sistemas fuera del equilibrio exhiben patrones en celdas con simetría hexagonal; los ejemplos incluyen desde columnas volcánicas de basalto a poros de anodización nanométricos, junto a otros casos hallados en hidrodinámica, óptica no-lineal, química y biología (Semwogerere & Schaltz, 2001). En numerosos sistemas químicos en solución se producen reacciones que generan una onda-patrón la cual se propaga a través del medio a partir del sitio inicial de perturbación. El frente de onda puede mantener una velocidad constante por el acoplamiento de difusión a la reacción química. Como el frente se propaga, se forman gradientes térmicos y de concentración que alteran la densidad de las soluciones, ocasionando frecuentemente convección (Nagy & Pojman, 1993). Si la reacción es exotérmica y los productos de la reacción son menos densos que los reaccionantes, entonces puede ocurrir convección simple. Si la reacción es isotérmica, la convección simple no ocurre, pero puede ocurrir convección multi-componente o doble-difusiva, la cual puede manifestarse como digitaciones salinas o “dedos salinos”, debidos a la configuración de los gradientes salino y termal, y así llamados por su descubrimiento en capas de mezcla de aguas en el océano. Mecanismos de este tipo han sido propuestos para explicar los efectos convectivos en ondas químicas. Trataremos de pasar revista a los mismos, yendo de los más simples a los más complejos.

El efecto Marangoni es un fenómeno por medio del cual ocurren movimientos en un líquido debido a diferencias locales en la tensión superficial. Con el avance de la experimentación se apreció que la convección resultante es causada por la diferencia en tensión superficial debida a diferencias locales de temperatura, lo que puede dar lugar a la formación de patrones, tanto ordenados como caóticos, a tenor de las características de los componentes de las soluciones. Esta propiedad ha sido utilizada desde antiguo, particularmente en obras artísticas de teñido. Haciendo flotar un tinte o pigmento sobre la superficie de un medio básico (agua o algún otro líquido viscoso), se puede cubrir la superficie con papel o tela para tomar una impresión. Ejemplos de esta forma de arte son los “Suminagashi” de Japón, jaspeados en tinta China, y el “papel Marmóreo”. Todas estas formas de arte utilizan el efecto Marangoni donde el movimiento del tinte o pigmento sigue la dirección de difusión, formando un patrón de color (Kuroda, 2000).

El movimiento en capas de fluido calentadas, con una superficie superior abierta al aire ambiente, ha sido extensamente estudiado desde el experimento de Bénard (1900). Una revisión de la convección de Bénard puede encontrarse en Normand et al (1977), Koschmieder (1993), y Bragard et al (1996), entre otros. Cuando una capa de fluido es calentada desde abajo y se enfría por encima, más allá de un gradiente crítico de temperatura, se forma un patrón de convección. En la convección Bénard-Marangoni (BM), ambas -flotación y tensión superficial- se ven involucradas y, después del establecimiento de la convección, se forman celdas poligonales (Cerisier et al, 2007). La convección BM es ahora muy conocida por su importancia práctica, debido a que está presente en una amplia variedad de procesos, tales como crecimiento de cristales, revestimiento de films, y experimentos en fluidos a baja gravedad (Schaltz & Neitzel, 2001). Dependiendo de la profundidad de la capa, se distingue dos tipos básicos de inestabilidad. En celdas suficientemente profundas, o en celdas en las cuales el fluido está confinado, la convección se establece cuando las fuerzas de flotación sobrepasan a las fuerzas de viscosidad (problema Rayleigh-Bénard). Alternativamente, en capas someras con una superficie abierta, las inhomogeneidades en la superficie de tensión son responsables de su establecimiento (problema Bénard-Marangoni). En ambos casos, la longitud de onda de la estructura convectiva depende de si los límites horizontales son buenos conductores térmicos o no (Block, 1956; Pearson, 1958). A pesar de la relativa simplicidad del sistema y del considerable esfuerzo dedicado a entender los fenómenos observados, varias cuestiones permanecen abiertas. Los experimentos de convección BM se realizan en laboratorio con films de diversas sustancias (aceite de silicona, mezclas de hidrocarburos, clorato-sulfito, cloruro-tetraionato, tiourea-cloruro de bario-ácido perclórico, etc.) dispuestas en cubetas con dispositivos de calentamiento y equipos que sirven para regular los parámetros de control y efectuar las mediciones, por lo que con frecuencia se trata de sistemas simplificados.

En la convección BM conducida por un gradiente de tensión superficial, el sistema evoluciona hacia una estructura hexagonal. Pasado el establecimiento de inestabilidad en la estructura hexagonal, con levantamiento de fluido en el centro de las celdas, se observa una transición entre hexágonos y rizos, un resultado que también es obtenido analíticamente. Nuevos términos advectivos afectan poco a los hexágonos pero desestabilizan el patrón de rizos. Experimentos numéricos hechos por Thess & Orzag (1995) no soportan la transición hexágonos-rizos pero muestran un leve incremento en el nivel de defectos de la estructura hexagonal.

Semwogerere & Schaltz (2001) han mostrado que los patrones hexagonales pueden contener múltiples diseños y que puede suscitarse competencia entre patrones ideales de dos dimensiones (hexágonos perfectos), donde cada diseño posee una diferente longitud de escala característica. Los defectos o irregularidades juegan un papel central en el proceso de selección de patrones. En diseños hexagonales, el defecto más común es un penta-hepta defecto (PHD), en el cual una celda pentagonal queda acuñada entre una trama de celdas hexagonales. Las investigaciones que han estudiado la dinámica de PHD's muestran que los hexágonos son producidos por convección, y son estables dentro de un rango de números de onda limitado por inestabilidades secundarias. Imponiendo un simple defecto en el patrón hexagonal, se aprecia que el defecto típicamente se mueve de un modo que selecciona un número de onda cerca del centro de una banda estable. La dirección promedio de movimiento del defecto depende fuertemente de los números de onda, y la moción del defecto es también tiempo-dependiente. Esta tiempo-dependencia está relacionada con procesos topológicos elementales observados en una amplia variedad de patrones celulares.

Los patrones de convección Bénard-Marangoni impuestos en experimentos mantienen una surgencia de líquido más cálido en los centros de celda y flujos hacia abajo en los bordes de las celdas. Aplicando un láser infrarrojo sobre la superficie libre, se introduce un calentamiento selectivo, creando un hot-spot, que fuerza a un rearrreglo del flujo con el diseño deseado, sea hexágonos

o un defecto aislado penta-hepta. Así, los hot-spot láser inducidos determinan áreas de flujo surgente en el patrón de convección. El nuevo patrón impuesto por el calentamiento del láser y su subsecuente evolución es entonces seguido y estudiado. Los defectos frecuentemente se propagan hacia el patrón interior. Sobre un estrecho rango de números de onda, los hexágonos conducen a la formación de rombos. La dinámica de los PHD's puede ser descrita como una superposición de tres rizos o enrollamientos, con números de onda bien definidos, formados lejos del defecto (Semwogerere & Schaltz, 2001).

Otros trabajos muestran que los hexágonos pueden también evolucionar lentamente hacia patrones desordenados con un único número de onda o presentar distintos comportamientos de deformación en los patrones observados (Cerisier et al, 2007; Colinet et al, 2002; Young & Riecke, 2002). En adición, la mayoría de los experimentos Bénard-Marangoni han sido realizados con aire como capa de gas superior (bajo número de Biot) porque permite simplificar el modelado teórico, obviando la densidad y viscosidad de la capa de gas. Pero en la realidad, en diversos medios, la fase gaseosa no es aire, y la conductividad térmica del gas superior (número de Biot) y las propiedades termofísicas del fluido (número de Prandtl) pueden influir sobre la formación de patrones y su dinámica. La importancia del número de Biot en la convección por termocapilaridad ha sido destacada por Bok-Cheol & Zebib (2002). Un reciente trabajo experimental ha estudiado la inestabilidad BM en una lámina de aceite de silicona de 2-5 mm de espesor con una capa de gas superior (aire con distintas concentraciones de helio y distintos números de Biot), utilizando interferometría para apreciar los campos de deformación de la superficie libre y termografía infrarroja para visualizar los campos de temperatura interfaciales (Cerisier et al, 2007). Los citados autores analizan la influencia del aspecto ratio, y de los números de Rayleigh, Biot y Prandtl, encontrando que se produce un mayor dinamismo incrementando el número de Biot, mientras que el incremento del número de Prandtl, inversamente, reduce la dinámica. Dos tipos de comportamiento de deformación de los patrones eran observados, en función de los números de Biot y Prandtl, y dependiendo del valor del gradiente de temperatura (Figura 22).

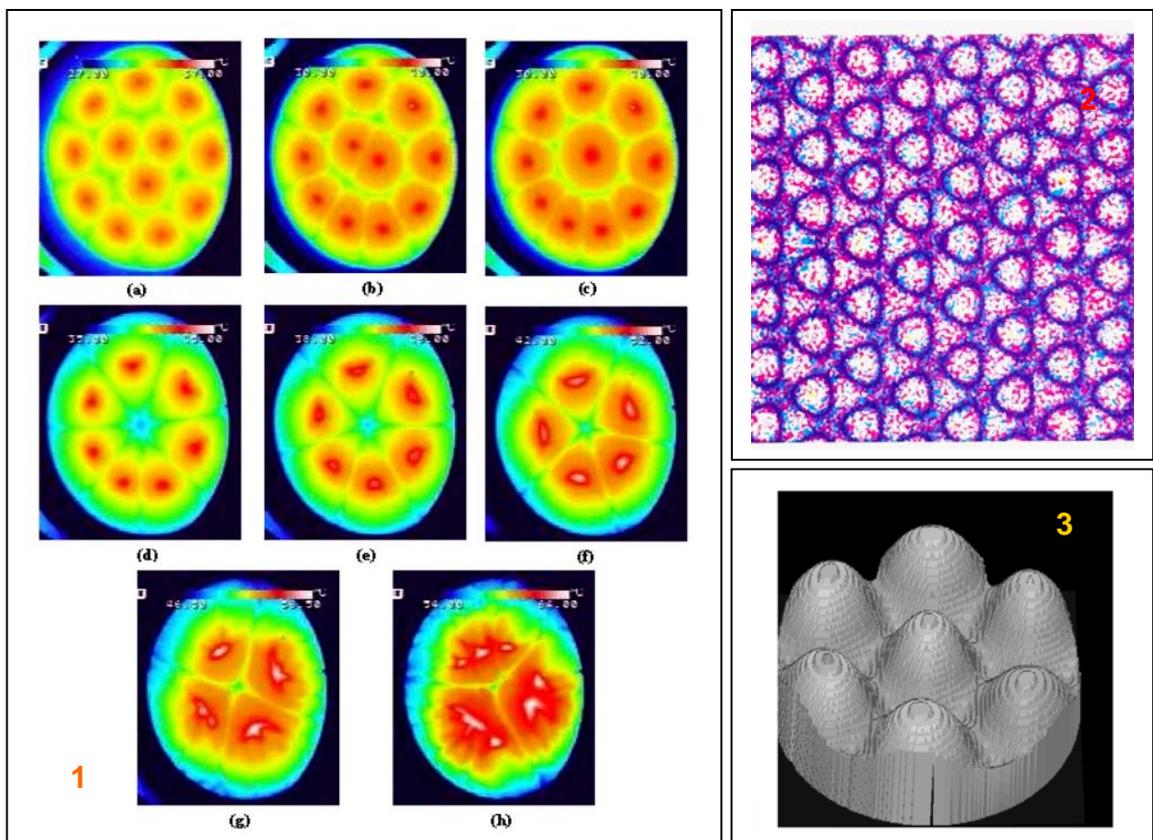


Figura 22. Patrones debidos a convección Bénard-Marangoni. (1) Patrones visualizados por termografía infrarroja bajo distintas condiciones experimentales en un recipiente cilíndrico. (2) Otro ejemplo de patrones de convección inducida por gradientes de tensión superficial. (3). Representación en 3D de la superficie libre del campo de deformación de un patrón BM visualizado por interferometría. (Fuente: 1-3: Cerisier et al, 2007; 2: Bragard et al, 1996).

La fascinación por patrones espacio-temporales que se forman espontáneamente en sistemas lejos del equilibrio, ha estimulado detalladas investigaciones que han permitido entender muchos aspectos de los patrones intrínsecos (aquellos que se forman bajo condiciones ideales, uniformes). Los patrones reales (aquellos que se forman en presencia de defectos y límites) son también importantes, pero difíciles de modelar. Ismagilov et al (2001) estudiaron un subconjunto de patrones reales y mostraron que tales patrones pueden también ser entendidos con una trama conceptual simple. Los patrones de convección eran rizos y las perturbaciones impuestas variaban en una sola dirección, alineada con la orientación de los rizos; la competencia de longitud de escalas era así limitada a una dimensión. El sistema, basado en la convección BM, forma patrones 2D de celdas de convección cuando no es constreñido. Cuando la fuerza conductora de la convección es modulada por perturbaciones topográficas (mediante diseños en la superficie de calentamiento), se obtienen diferentes patrones y cambios en la escala de celdas según se varíe la modulación en una o en dos direcciones. La estructura puede ser modificada también en celdas de convección hexagonales, cuadradas, y triangulares, al modificar los patrones topográficos, y puede ser visualizada por imaginería infrarroja.

Otros trabajos han incluido en el establecimiento de convección en una capa de fluido, además de una fuente de calor, dos diferentes campos de sales disueltas, con distinta concentración salina (convección de difusividad-triple o multi-componente). Una convección de este tipo involucra dos especies en competición. Así como la convección doble difusiva presenta un cuadro mucho más rico de comportamiento que la clásica de un simple componente del caso Bénard, la inclusión de otro campo salino conduce a situaciones más complejas. En los estudios hechos sobre convección triple-difusiva se ha hallado que la convección sigue una ley de densidad no-lineal (la cual introduce el fenómeno de convección penetrativa) y produce un curioso efecto: una curva neutral oscilatoria desconectada de la curva de convección estacionaria, con ambas curvas teniendo el mismo número de Rayleigh, pero diferentes números de onda. Esto significa la posibilidad de inicio simultáneo de convección por dos mecanismos diferentes, pero con dos diferentes ratios de aspecto (diferente ancho y profundidad de celda) (Straughan & Tracey, 1999).

La convección multi-componente puede también ser inducida por frentes reactivos. Varios trabajos muestran que las reacciones autocatalíticas pueden soportar un frente de onda de velocidad constante por el acoplamiento de difusión a la reacción química (Nagy & Pojman, 1993; Bánsági et al, 2003). De este modo se pueden generar la convección multicomponente conocida como "dedos salinos", los cuales se manifiestan como largas y delgadas franjas alternas de fluidos descendentes y ascendentes.

Por su aplicación para la industria petrolera también se ha investigado la difusión y convección multicomponente en mezclas de hidrocarburos en medio poroso. En reservorios de hidrocarburos el metano es frecuentemente segregado hacia el fondo caliente, pero puede también estar concentrado en el tope frío superior de mezclas ternarias y reservorios de fluidos multicomponentes, como lo indican los datos de campo. Ello es debido a la competencia entre distintos mecanismos de difusión, donde la convección puede afectar significativamente las variaciones en composición. Dependiendo de las mezclas de fluidos, una convección débil puede cambiar drásticamente la variación en composición, mostrando considerables discrepancias entre los datos experimentales y las predicciones teóricas, tanto en sentido vertical como horizontal (Ghorayeb & Firoozabadi, 2000). Los datos de difusión molecular y termal para mezclas de tres o más componentes, especialmente para hidrocarburos en condiciones de reservorio, son escasos, y se trabaja activamente en simular las variaciones de composición en columnas porosas con mezclas ternarias, ya que son radicalmente diferentes a las binarias, debido a difusión molecular cruzada, difusión termal, convección y flujos dependientes de los gradientes de presión (segregación gravitacional) y térmicos.

Sin duda el más importante avance en el campo de la formación de patrones y bifurcaciones que rompen la simetría, fue el hecho por Turing (1952), en el cual propuso que el acoplamiento de la difusión con la cinética química no-lineal es suficiente para producir soluciones estacionarias, las cuales conducen a inhomogeneidad espacio-temporal. Este acoplamiento fue visto en la época como un perfecto acierto para racionalizar la morfogénesis. El mecanismo puede ser descrito por una simple ecuación, que relaciona la matriz de los coeficientes de difusión y la función no-lineal que representa la cinética química. Típicamente, el ambiente cinético no-lineal puede ser generado por autocatálisis o auto inhibición, especialmente por el primero. Otras no-linearidades pueden ser generadas por condiciones de flujo. Una solución simple de la ecuación da patrones espacio-temporales si la escala de longitud del activador de más rápida reacción es menor que el del inhibidor de más lenta reacción. Los patrones pueden ser desarrollados para diversas longitudes de onda químicas.

Los físicos y químicos gastaron las cuatro décadas siguientes a la publicación de Turing tratando de diseñar un sistema químico que pudiera generar patrones espacio-temporales basados en el esquema matemático de Turing. Pero no fue hasta 1990 que se logró obtener patrones similares a los de Turing utilizando un sistema químico de ácido malónico-clorito-iodado. A pesar del éxito de la teoría de Turing para racionalizar la morfogénesis, subsisten diversos problemas. El más importante es que las fuerzas de reacción y difusión no son las únicas que operan en un sistema químico bifurcante para dar patrones espacio-temporales. El más importante producto de las fuerzas de reacción-difusión es la convección y puede ser generada por gradientes termales y de concentración los cuales subsecuentemente producen gradientes de densidad.

Tomando un sistema altamente convectivo, Simoyi (1999) ha caracterizado las bifurcaciones de ruptura de simetría. Con un medio químico reactivo, exotérmico, bi-estable (thiourea, ácido perclórico, cloruro de bario, y ácido amino-metano-sulfínico), y sujeto a una inestabilidad generada por la adición de autocatalizadores, examinó las formas de los frentes de onda, velocidad de las ondas y patrones generados tras el paso de las ondas, logrando obtener patrones parecidos a los de Turing, en un ambiente que incluye convección. Sin embargo, el mismo autor señala que, mientras las rayas de cebras y las motas de leopardos pueden ser explicadas por el modelo de Turing, el desarrollo de una estructura tri-dimensional contiene no obstante ulterior complejidad, la cual no resulta explicable sólo por los mecanismos básicos de reacción-difusión. En sus experimentos, Simoyi (1999) encuentra que la reacción de la solución produce una fascinante auto-organización en patrones concéntricos. Los anillos de precipitados de sulfato de bario se intercalan con otros sin precipitación, y también se forman patrones longitudinales alineados a la dirección de propagación de las ondas, tras las mismas. En una región más posterior se forman erupciones de violenta actividad hidrodinámica, cuya apariencia es similar a la de plumas termales. En general, la onda presenta tres regiones distintas de precipitación. Las plumas termales son formadas entre las dos posteriores. La secuencia es repetida indefinidamente mientras no entran en juego los límites de la vasija. En grandes vasijas obtiene más de 20 secuencias. Los torus convectivos concéntricos se van solapando, con la pluma de un nuevo torus surgiendo tras el torus previo. El desarrollo de digitaciones subsecuentemente se transforma en las plumas que forman las erupciones. El trabajo muestra cómo una reacción química exotérmica puede generar bifurcaciones con ruptura de simetría, por disipación de energía química, la cual produce los gradientes de tensión superficial y de densidad, dando lugar a patrones muy parecidos a los de Turing. Los experimentos sugieren que la convección es un factor muy importante en la generación de estructuras y formas, en prácticamente cualquier medio homogéneo.

El acuífero intergranular de Jaizkibel es una estructura tri-dimensional, multicomponente en su química y mineralogía, asimilable a un medio poroso inhomogéneo, con flujos dinámicos alimentados por las precipitaciones (y donde la insolación y evaporación introducen diferencias térmicas). Es además un sistema hidrogeológico que evoluciona a lo largo del tiempo y, como en el karst

clásico, la infiltración difásica puede contener fases gaseosas asociadas con aire cargado de distintas concentraciones de CO_2 . Los procesos de disolución (y precipitación) en el interior del sistema adquieren por tanto una complejidad considerable. Entre las fuerzas que operan en el sistema seguramente intervienen algunas de las antes expuestas, como reactividad química, difusión y convección multicomponente, en proporciones que desconocemos. Pero que pueden influir en la formación de patrones de celdas poligonales, alveolos, bandas de coloración, y en la extraordinaria diversidad de cavidades y geoformas (Figura 23 y 24).



Figura 23. Diversidad morfológica de cavidades en la arenisca de Jaizkibel.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

El mecanismo para el desarrollo de formas y estructuras en medios relativamente homogéneos ha intrigado a los científicos durante años. El viejo problema de la formación de bandeados de Liesegang permanece en espera de una explicación sólida. La descripción matemática de bifurcaciones que rompen la simetría hidrodinámica, usando ecuaciones de reacción y difusión, requiere especiales precondiciones, lo cual hace difícil replicarlas en sistemas físicos reales (Simoyi, 1999). La formación de tales patrones es impulsada por mecanismos de disipación de la energía química, los cuales intervienen en la morfogénesis.

Creciente atención ha sido prestada a la generación de estructuras cristalinas curvas, que imitan la simetría propia de los seres vivos, y que han sido llamadas "biomorfos". Investigadores como Stephen Hyde (de la Universidad Nacional de Australia) y Juan M. García Ruiz (del Laboratorio de Estudios Cristalográficos del CSIC en Granada) han hallado estructuras cristalinas, generadas espontáneamente, que se apartan de la morfología típicamente asociada a cristales. Son estructuras inorgánicas que demuestran que no existe una delimitación marcada y nítida entre el mundo morfológico de la simetría orgánica y el de la simetría cristalina, inorgánica. Los investigadores han trabajado en laboratorio en el crecimiento de cristales de carbonato a partir de soluciones que contienen también sílice. Precisamente lo que genera el crecimiento de las formas biomorfas es la reacción química entre ambos minerales, dando origen a cristalitas de carbonato recubiertos de sílice. El detonante es el acoplamiento entre la precipitación de sílice y la de carbonato, donde el cristal inicial se rompe en millones de nanocristales que se autoorganizan constituyendo láminas. Esas láminas inician un mecanismo de rizo, un proceso a lo largo del cual se crean formas de curvatura continua (Van Den Berg, 2009). Las condiciones de alcalinidad y concentración de sílice en los experimentos de laboratorio son propias de ambientes extremos. Geoquímicamente, estos biomorfos de sílice-carbonato, es posible que existan en aguas alcalinas y en chimeneas hidrotermales submarinas, aunque todavía no han sido hallados en la naturaleza.

Significativamente, en el pseudokarst de Jaizkibel estamos hallando geoformas inusuales, como Paramoudras y otras raras concreciones (Galán & Molia, 2008; Galán et al, 2008, 2009), que se formaron en un medio extremo (turbiditas abisales), y en cuya génesis puede estar involucrada actividad hidrotermal submarina. Así, las areniscas ahora expuestas en Jaizkibel, pueden contener asociaciones minerales complejas en partículas de pequeño tamaño, como ha sido detectado mediante técnicas analíticas finas, principalmente microscopía y espectroscopía de transmisión de alta resolución, entre ellas: espectroscopía Raman y por fotoelectrones de rayos X, microscopio electrónico de barrido (SEM), microscopio de fuerzas atómicas (AFM), microanálisis por dispersión de energía (EDX), y microfotografía (Galán & Vera Martín, 2009; Galán & Oyarzabal, 2009; Galán et al, 2009, 2010). A partir de tales componentes la disolución intergranular puede haber trabajado sobre sistemas sílice-carbonato, hierro-carbonato, y

otros sistemas complejos, generando una multiplicidad de geofomas (Figura 24). Tal argumento por analogía no constituye por supuesto una prueba, pero deja abierta la posibilidad de ocurrencia de fenómenos análogos a los implicados en biomorfos, sólo que a una escala distinta, observable en la naturaleza.



Figura 24. Boxworks formados a partir de patrones de grandes celdas en una cavidad de Jaizkibel (arriba) y formas alveolares con patrones diversos en otra (debajo). La disolución intergranular parece haber trabajado sobre sistemas sílice-carbonato en los primeros y de carbonato en los segundos, pero pueden estar involucrados hierro-carbonato y otros sistemas complejos, generando formas inusuales.

Algunos rasgos observables en las geoformas del pseudokarst, parecen estar relacionados con operaciones y técnicas de cifrado, estudiadas en criptografía. Tal es el caso de las formas que se asemejan a escrituras en la roca. Vale la pena recordar que "cifra" es una palabra árabe usada para designar el número cero. Antiguamente, cuando en Europa empezaba a dejarse de usar el sistema de numeración romano, pasándose al árabe, se desconocía el cero, el cual resultaba misterioso, de ahí que cifrado tenga también el sentido de un significado misterioso. Las dos técnicas más sencillas de cifrado en criptografía, consisten en las operaciones de sustitución (= cambio de los elementos básicos del mensaje -las letras, los dígitos o los símbolos-) y transposición (= reordenación de los mismos); la gran mayoría de los cifrados son combinaciones de estas dos operaciones básicas. El conjunto constituye un criptosistema. En las reacciones geoquímicas implicadas en la desigual cementación de la arenisca (y por consiguiente en la génesis de geoformas) puede haber ocurrido la sustitución y transposición de elementos químicos y sustancias minerales, generando patrones que luego serán traducidos en colores y formas. Por ejemplo, en nuestra opinión, es por demás llamativo la diversidad de diseños y coloraciones que presenta la arenisca sobre áreas pequeñas de un mismo estrato. En las de tonos rojos y anaranjados todo indica que están implicadas diferentes concentraciones de minerales de hierro. En fin, esto es sólo una sugerencia o interrogante, que espera también una explicación más sólida.

En las geoformas que hemos denominado bandas de Moebius, existe una interacción en la que la banda en sí está relacionada con escurrimientos y franjas sobre la recementada superficie externa de la arenisca. Las bandas parecen haber sido parte de superficies anteriores (Figuras 5 y 17), donde la recementación superficial se ha conservado, mientras la disolución intergranular ha arenizado (y rebajado) la roca adyacente. Estos últimos testigos están siendo perforados por pequeños alveolos, en los cuales la arenización parece avanzar en pequeños dominios, desde el borde hacia el centro de las bandas. La base química y geológica de estas diferencias en la competencia de los materiales y generación de tales formas no es conocida. Aunque pueda ser descrita como simple avance de la arenización de la roca, no deja de ser curiosa esta morfología. No hemos encontrado en la literatura geológica ninguna referencia a geoformas alveolares semejantes, en todo el globo, por lo que las bandas de Moebius descritas en este trabajo constituyen probablemente un nuevo tipo de geoforma.

Diversos autores han sugerido que los sistemas químicos constituidos por soluciones reactivas de varias sustancias pueden formar patrones complejos, entre ellos, patrones hexagonales, patrones concéntricos y plumas termales. Las reacciones químicas exotérmicas impulsan la formación de tales patrones a través del acoplamiento de efectos tipo Marangoni y Rayleigh-Bénard. Tales efectos se originan a partir de convección multicomponente, la cual impulsa la formación de digitaciones salinas. Estas digitaciones se pueden curvar y enroscar hacia arriba formando plumas. Los patrones concéntricos resultan de la formación de un completo *torus* convectivo. La formación de series de *torus* convectivos estacionarios sugiere que existen otras posibilidades de mecanismos en las soluciones, las cuales pueden generar patrones parecidos a los de Turing, antes comentados (Simoyi, 1999). En la cinética de las reacciones que tienen lugar en el acuífero intergranular en la arenisca, las sustancias que reaccionan en primer lugar pueden generar ondaspatrón 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. Hasta hace una década era poco o nada lo conocido sobre la presencia de cavidades y geoformas en la arenisca de Jaizkibel. En los últimos años, sucesivas prospecciones y exploraciones, han permitido el hallazgo y estudio de más de 200 cavidades y puntos de interés geológico en un pseudokarst notable, por contener ejemplos de gran interés científico, algunos de ellos únicos en el mundo.

El Pseudokarst de Jaizkibel constituye así un singular territorio con innumerables ejemplos de geoformas que muestran patrones de disipación de energía, los cuales han sido formados por ondas de actividad química. De su comportamiento coherente emergieron de modo espontáneo celdas y vórtices de circulación que han dejado su impronta en la roca, como macroformas, algo que no es frecuente encontrar en la naturaleza. Estas se han formado en puntos críticos de inestabilidad lejos del equilibrio.

La termodinámica clásica condujo al concepto de estructuras en equilibrio, tales como los cristales. Las celdas de tipo Bénard son también estructuras, pero de otra índole. Lo paradójico, aparentemente, en este tipo de estructuras disipativas es la relación entre estructura y orden por un lado y disipación por el otro. En termodinámica clásica, la disipación de energía en transferencia de calor, fricción y demás, se asociaba siempre con pérdida. La teoría moderna de estructuras disipativas de Prigogine introdujo un cambio radical en esta visión, demostrando que en los sistemas abiertos, la disipación es una fuente de orden. Tales estructuras no sólo se mantienen en un estado estable lejos del equilibrio, sino que pueden incluso evolucionar. Cuando el flujo de materia y energía a través de ellas aumenta, pueden pasar por otras inestabilidades y transformarse en nuevas estructuras de incrementada complejidad, y todo ello a través de procesos de autoorganización en medio inorgánico. La amplificación de la retroalimentación, que había sido tradicionalmente considerada destructiva en cibernética, aparece como fuente de un nuevo orden y complejidad en las estructuras disipativas. Y Jaizkibel expone excelentes ejemplos para demostrar esto.

Los extravagantes diseños presentes en las geoformas de Jaizkibel, admiten en consecuencia la posibilidad de ocurrencia de diversos mecanismos y procesos. Con el resultado de un complejo mosaico de formas y coloraciones, de notable belleza estética. Difícilmente podemos clamar que comprendemos en todo su detalle los factores y causas involucrados en su génesis y evolución. Simplemente nos conformamos con exponer algunos de sus rasgos y aportar elementos para la elucidación de sus causas.

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos compañeros y colaboradores de la Sociedad de Ciencias Aranzadi que nos han acompañado en los trabajos de campo y de modo especial a: Carolina Vera Martín, Aize García, Iñigo Herraiz, Michel Molia, Jose Mari Beobide, Loli Nieto Rubia, Daniel Arrieta, Olatz Zubizarreta, e Izaskun Katarain. A Franco Urbani, Luis Viera, y Carlos Oyarzabal, por sus siempre útiles recomendaciones y sugerencias.

BIBLIOGRAFIA

- Bánsági, T.; D. Horváth & A. Tóth. 2003. Multicomponent convection in the chlorite-tetrathionate reaction. *Chemical Physics Letters*, 384 (1-3): 153-156.
- Bénard, H. 1900. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. *Rev. Gen. Sci. Pure Appl.*, 11: 1261-1309.
- Block, M.J. 1956. Surface tension as the cause of Bénard cells and surface deformation in a liquid film. *Nature*, 178: 650-651.
- Bok-Cheol, S. & A. Zebib. 2002. Effect of free surface heat loss and rotation on transition to oscillatory thermocapillary convection. *Physics of Fluids*, 14 (1): 225-31.
- Bragard, J.; J. Pontes & M.G. Velarde. 1996. Patterns, defects, and evolution of Bénard-Marangoni cells. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 6 (9): 1665-1671.
- Campos, J. 1979. Estudio geológico del Pirineo vasco al W del río Bidasoa. *Munibe, S.C.Aranzadi*, 31(1-2): 3-139.
- Cerisier, P.; S. Rahal & H. Azuma. 2007. Pattern dynamics of the Bénard-Marangoni instability in a medium aspect ratio container. *Second Internat. Symp. Instability and Bifurcations in Fluid Dynamics. Journal of Physics: Conference Series*, 64: 1-9.
- 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. 2010. Evolución de la fauna cavernícola: mecanismos y procesos que explican el origen de las especies troglóbias. *Bol. SVE*, 44: 22 pp + Pag. web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 31 pp.
- Galán, C. & J. Lagarde. 1988. Morphologie et évolution des cavernes et formes superficielles dans les quartzites du Roraima. *Kartologia*, 11-12: 49-60.
- 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. & 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. & 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.; J. Rivas & M. Nieto. 2007. Pseudokarst en arenisca del flysch costero Eoceno, Gipuzkoa. Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 44 pp. + Pag web Cota0.com, Art. Cienc., 44 pp.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2008. Geofomas cordadas en arenisca del flysch costero Eoceno, Gipuzkoa. Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 28 pp.
- Galán, C.; J. Rivas & M. Nieto. 2008. Estructuras de corriente en turbiditas del flysch Eoceno. Pseudokarst en arenisca, Gipuzkoa (País Vasco). Pag web aranzadi-sciences.org, Archivo PDF, 32 pp.
- Galán, C.; 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 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.
- Ghorayeb, K. & A. Firoozabadi. 2000. Modeling Multicomponent Diffusion and Convection in Porous Media. *Soc. Petroleum Engineers Journal*, 5 (2): 158-171.
- Ismagilov, R.F.; D. Rosmarin; D.H. Gracias; A.D. Strook & G. Whitesides. 2001. Competition of intrinsic and topographically imposed patterns in Bénard-Marangoni convection. *Applied Physics Lett.*, 79 (3): 439-441.
- Kempe, D. R. C. 1981. Deep ocean sediments. In: Cocks, L. R. M. *The Evolving Earth*. British Museum (Natural History), Cambridge Univ. Press, III (7): 103-120.
- Koschmieder, E.L. 1993. *Bénard Cells and Taylor Vortices*. Cambridge University, Cambridge, U.K.
- Kuroda, T. 2000. The Marangoni Effect and Its Artistic Application. *Forma*, 15: 203-204.
- Margalef, R. 1986. Sucesión y evolución: su proyección biogeográfica. *Paleontología i Evolució*, 20: 7-26.
- 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.
- Murray, J. 1981. A pre-pattern formation mechanism for animal coat markings. *J. Theor. Biol.*, 88: 161-199.
- Mutti, E. 1985. Turbidite systems and their relations to depositional sequences. In: *Provenance from arenitas*. Proceeding Nato-Asi meeting, Cetraro-Cosenza, Italy. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Netherlands, 65-93.
- Nagy, I.P. & J.A. Pojman. 1993. Multicomponent convection induced by fronts in the chlorate-sulfite reaction. *J. Phys. Chem.*, 97 (13): 3443-3449.
- Normand, C.; Y. Pomeau & M.G. Velarde. 1977. Convective instability: A physicist approach. *Rev. Mod. Phys.*, 49 (3): 581-624.
- Pearson, J.R. 1958. On convection cells induced by surface tension. *J. Fluid Mech.*, 4: 489-500.
- Rosell, J. 1988. Ensayo de síntesis del Eoceno sudpirenaico: El fenómeno turbidítico. *Rev. Soc. Geol. España, Márgenes continentales de la Península Ibérica*, Vol. 1 (3-4): 357-364.
- Schatz, M.F. & G.P. Neitzel. 2001. Experiments on thermocapillary instabilities. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 33 (6): 93-127.
- 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.
- Straughan, B. & J. Tracey. 1999. Multi-component convection-diffusion with internal heating or cooling. *Acta Mechanica*, 133: 219-238.
- Thess, A. & S. Orzag. 1995. Surface-tension-driven Bénard convection at infinite Prandtl number. *J. Fluid. Mech.*, 4: 1-21.
- Turing, A. 1952. The chemical basis of morphogenesis. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, (B)* 237: 37-72.
- Urbani, F. 1986. Notas sobre el origen de las cavidades en rocas cuarcíferas precámbricas del Grupo Roraima, Venezuela. *Interciencia*, 11(6): 298-300.
- Van Den Berg, E. 2009. Imitando la vida: biomorfos. *National Geographic*, Diciembre 2009, Vol. 25 (6): 12 pp.
- Van Vliet, A. 1982. Submarine fans and associated deposits in the Lower Tertiary of Guipúzcoa (Northern Spain). Thesis Doct., Univ. Utrecht, Netherlands, 180 pp.
- Young, Y. & H. Riecke. 2002. Mean flow in hexagonal convection: stability and nonlinear dynamics. *Physica D*, 163: 166-183.