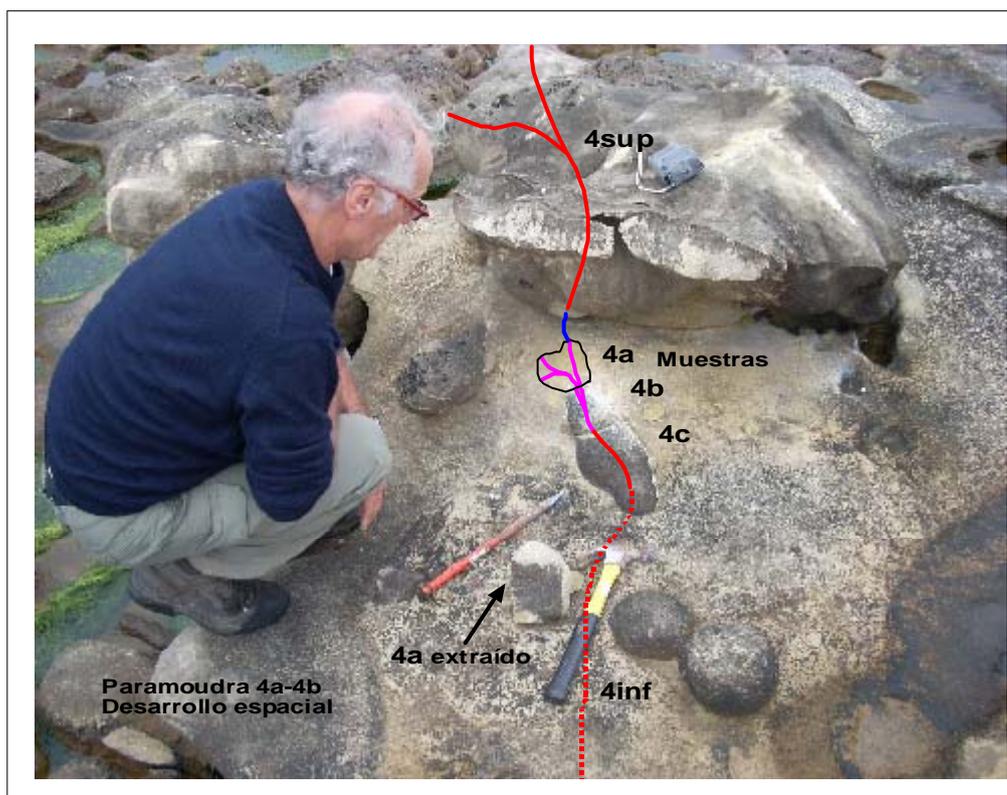


**NUEVOS DATOS SOBRE PARAMOUDRAS Y CONCRECIONES RELACIONADAS EN JAIZKIBEL E IGUELDO
(PSEUDOKARST EN ARENISCA DEL FLYSCH EOCENO, GIPUZKOA)**

New data about Paramoudras and related concretions in Jaizkibel and Igueldo
(Pseudokarst in sandstone in the Eocene flysch, Gipuzkoa)



Carlos GALAN¹; Michel MOLIA^{1,2}; Marian NIETO¹ & José RIVAS¹

¹ Sociedad de Ciencias Aranzadi. Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.

E-mail: cegalham@yahoo.es

² 4 Ch. du grand basque. 64100 Bayonne - France.

E-mail: michel.molia@free.fr

(Diciembre 2008)

Con la colaboración de: **Luis VIERA¹; Marider BALERDI¹ & Iñigo HERRAIZ¹.**

NUEVOS DATOS SOBRE PARAMOUDRAS Y CONCRECIONES RELACIONADAS EN JAIZKIBEL E IGUELDO (PSEUDOKARST EN ARENISCA DEL FLYSCH EOCENO, GIPUZKOA)

New data about Paramoudras and related concretions in Jaizkibel and Igueldo
(Pseudokarst in sandstone in the Eocene flysch, Gipuzkoa)

Carlos GALAN¹; Michel MOLIA^{1,2}; Marian NIETO¹ & José RIVAS¹

¹ Sociedad de Ciencias Aranzadi. Alto de Zorroaga. E-20014 San Sebastián - Spain.

E-mail: cegalham@yahoo.es

² 4 Ch. du grand basque. 64100 Bayonne - France.

E-mail: michel.molia@free.fr

(Diciembre 2008)

Con la colaboración de: Luis VIERA¹; Marider BALERDI¹ & Iñigo HERRAIZ¹.

RESUMEN

Se describen nuevos tipos de Paramoudras, cannonballs y concreciones relacionadas en arenisca de edad Eoceno. Los Paramoudras adoptan formas esféricas, subcilíndricas, serpentiformes, espongiiformes, y en masas o magmas anastomosados, con extravagantes diseños. Contienen perforaciones con estructuras tubulares conspicuas. Su morfología y desarrollo espacial son descritos en base a observaciones de campo y cortes experimentales. Los ichnofósiles de los Paramoudras, de poliquetos marinos -probablemente-, contienen tubos de pequeño diámetro con glauconita y magnesita. Es también probable la presencia óxidos de hierro y manganeso. Las concreciones no poseen estructura concéntrica, pero su envoltura externa puede presentar anillos de Liesegang. Se discuten diversos aspectos sobre su origen, características y bioichnología.

Palabras clave: Paramoudras, pseudokarst, arenisca, concreciones, geología, biología, ichnología, geoformas.

ABSTRACT

Different kinds of Paramoudras, cannonballs and related concretions in sandstone of Eocene age are described. The Paramoudras adopt spherical, subcylindrical, serpent and sponge shapes, and aggregate masses or magmas, with odd designs. These concretions present conspicuous tubular drillings and structures. Their morphology and spatial development are described on the basis of field observations and experimental sections. The ichnofossils of Paramoudras, probably of marine polychaetes, contain tubular drillings and structures with glauconite and magnesite. It is also probable the presence of iron and manganese oxides. The concretions don't have a concentric structure but their external cover may present Liesegang bandings. Several aspects about their origin, characteristics and bioichnology are discussed.

Key words: Paramoudras, pseudokarst, sandstone, concretions, geology, biology, ichnology, geoforms.

INTRODUCCION

En un trabajo previo describimos la presencia de Paramoudras en una localidad de la costa central de Jaizkibel (GALAN & MOLIA, 2008). La presencia de estas geoformas es sin duda conocida desde antiguo por los escasos pescadores que frecuentan estos abruptos parajes costeros, pero sus esculpidos relieves eran considerados meros caprichos de la naturaleza, producto de la erosión de las rocas. Es sólo ahora, con estos trabajos, que develamos lo esencial de sus rasgos.

Los Paramoudras son concreciones silíceas de variado tamaño (hasta varios metros) organizadas en torno a tubos o madrigueras de débil diámetro de organismos marinos tubícolas fosadores. Las concreciones cilíndricas pueden tener un trayecto vertical importante (5 m) y desarrollos horizontales de hasta 10-15 m (FELDER, 1971). La organización tubo axial -concreción silícea es el resultado de una diagénesis concéntrica en torno a las madrigueras o tubos fósiles (ichnofósiles), debida a fenómenos de óxido-reducción a lo largo de un gradiente redox en el sedimento y en torno a los tubos (BROMLEY et al., 1975; BRETON, 2006). Explicaciones sobre su diagénesis y minerales formados son dados por los citados autores y un resumen sintético aparece en GALAN & MOLIA (2008).

En la arenisca de Jaizkibel los Paramoudras típicamente consisten en concreciones esféricas a cilíndricas (de 10 cm á más de 1 m de diámetro), con perforaciones en superficie y estructuras tubulares internas que se desarrollan desde vertical a horizontalmente a lo largo de su eje axial; pueden presentar ramificaciones o aglutinarse en masas conjugadas cuyas formas pueden recordar a senos, esferas, cilindros, hongos, ánforas, esponjas, falos, gusanitos, tortugas, focas, etc. La diversidad de



Paramoudras esféricos, predominantes en Jaizkibel 2. Puede apreciarse que hay formas individuales y anastomosadas, de distintas maneras. Algunas poseen orificios en el polo superior, otras laterales. Las uniones dan origen a figuras que pueden recordar a gusanitos o tortugas.



Paramoudras esféricos en Jaizkibel, algunos anastomosados o unidos a magmas mayores. Nótese la erosión en las esferas sometidas a la acción del mar y a la alteración por organismos del bentos litoral. Los surcos de delimitación, envolturas o gangas son poco evidentes y las esferas están fuertemente unidas al sustrato.

diseños de las esculturas resultantes es enorme y en las areniscas de Jaizkibel sus formas están extraordinariamente bien preservadas, representando probablemente algunos de los mejores ejemplos existentes a nivel mundial.

En esta nota presentamos el hallazgo de dos nuevas localidades con Paramoudras, una de ellas próxima al primer hallazgo de Jaizkibel, y la otra en la costa central de Igueldo al W de Urberde. En ambos casos existen grutas y cavidades pseudokársticas en escarpes próximos a las zonas con Paramoudras, así como una profusión relativamente importante de cannonballs (concreciones esféricas de cemento carbonatado), las cuales no contienen ichnofósiles ni estructuras tubulares perforantes. La segunda localidad de Jaizkibel es particularmente ilustrativa de la existencia de formas intermedias y anastomosadas en una increíble variedad de combinaciones, existiendo numerosos casos de imbricaciones de Paramoudras individuales que atraviesan o se fusionan entre sí y con masas irregulares o magmas mayores. En ocasiones los Paramoudras columnares quedan envueltos por concreciones posteriores, sugiriendo una sucesión de fases de concrecionamiento y cementación durante la diagénesis de la arenisca.

A lo largo de varios meses han sido tomadas algunas muestras para estudiar la composición de las concreciones y especialmente para tratar de entender su desarrollo espacial, siguiendo la traza de las estructuras tubulares de los ichnofósiles a través de cortes y secciones. Ello ha desembocado en una mejor comprensión de sus rasgos y desarrollos, con singulares detalles, que trataremos de describir y exponer a lo largo de esta nota.

MATERIAL Y METODOS

Se realizaron múltiples salidas de reconocimiento a lo largo de la zona costera entre Orio, San Sebastián y Hondarribia, particularmente en las partes centrales de los montes Igueldo, Ulía y Jaizkibel, prospectando diversos enclaves de difícil acceso. Se hallaron Paramoudras y concreciones relacionadas en dos nuevas zonas, cuya descripción se presenta en esta nota. Se efectuaron reconocimientos detallados (en superficie y entre bloques, grutas y espacios inter-estratos), con el fin de obtener el mayor número posible de datos sobre la extensión y disposición de las geoformas en los estratos individuales de arenisca. Algunos datos adicionales también fueron tomados sobre pistas fósiles de diversos organismos (en contactos entre las areniscas y lutitas interestratificadas en la serie flysch).

La morfología de los Paramoudras es descrita e ilustrada mediante fotografías, así como su contexto. Las muestras fueron tomadas cuidadosamente tratando de impactar lo mínimo posible los lugares de extracción, buscando piezas sueltas o que resultaran relativamente fáciles de extraer mediante el simple uso de cincel y martillo, y de dimensiones y peso moderados (hasta unos 20 kg), de modo que fuera factible su transporte a pie (en morral). Fueron tomados datos y medidas in situ y en laboratorio. Diversas muestras fueron objeto de cortes experimentales (secciones transversales y algunas longitudinales), las cuales fueron analizadas de modo preliminar. En los afloramientos fueron tomados datos complementarios sobre la estructura, litología, distribución espacial de los Paramoudras y su posición estratigráfica relativa en esos tramos de la serie flysch. Una larga serie de ejemplos de Paramoudras y detalles de las muestras tomadas es ilustrada mediante fotografía digital y dibujos en programa Freehand.

RESULTADOS

CANNONBALLS Y PARAMOUDRAS EN IGUELDO

Las geoformas más usuales en la arenisca de la Formación Jaizkibel se presentan en los estratos más compactos de la parte superior de la serie de turbiditas del flysch Eoceno y corresponden a cannonballs o concreciones esféricas de arenisca, de litología similar a la roca-caja adyacente pero más fuertemente cementadas.

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

Se denomina Cannonballs (= bolas de cañón) a grandes concreciones esféricas de arenisca, generalmente de entre 0,5 y 1 m de diámetro. En forma similar a otras concreciones, resultan más resistentes a la meteorización que la roca encajante que las rodea, y con frecuencia se desprenden y caen hacia la base de los taludes de los relieves en que afloran. Las cannonballs son formadas por cementación, siendo el carbonato cálcico el principal agente cementante. Pueden contener un pequeño



Zona con lajas y bloques caóticos de desprendimiento, en un sector del litoral central de Igueldo. Puede apreciarse grandes cannonballs y oquedades producto de su caída, inclusiones de material lutítico, y Paramoudra con forma que recuerda a vértebras articuladas (imagen inferior derecha).



Excepcional ejemplo de la sección longitudinal de un Paramoudra de 4,5 m de longitud en Igueldo. Aunque la cara seccionada del bloque colapsado de arenisca ocupa ahora una posición vertical, la disposición original del Paramoudra era subhorizontal. Se aprecian cortas ramificaciones laterales (erosionadas) y perforaciones verticales, pero el cordón axial sólo es apreciable en algunos cortos fragmentos.

núcleo de material orgánico (fragmento de una concha o de un vegetal). Su forma esférica sugiere que su crecimiento no se ve constreñido por las estructuras sedimentarias primarias o fábricas, tal como puede ser el caso en concreciones planares o más irregularmente formadas.

En diversos tramos de arenisca compacta de Igueldo son frecuentes cannonballs. Predominan ampliamente las oquedades en la roca, resultantes de su caída o vaciado. Y en realidad son pocas las zonas en que las concreciones esféricas afloran en relieve positivo (o seccionadas). En una zona muy fracturada y rellena de bloques de desprendimiento, en la parte central de la costa (al W de Urberde), encontramos buenos ejemplos de cannonballs, con diámetros desde 0,1 á 1 m. Algunas geoformas muy gruesas ocupan casi todo el espesor del estrato; otras poseen inclusiones de lutitas o materia orgánica que ha actuado como núcleo aglutinante de la concreción. Además hallamos algunos ejemplares de Paramoudras.

El más espectacular, por estar seccionado a lo largo de su longitud, alcanza 4,5 m de largo x 20-50 cm de anchura y presenta perforaciones verticales de débil diámetro. Debido a la erosión no resulta fácil discernir si posee un tubo axial longitudinal, pero posee una serie de hendiduras laterales que corresponden a ramificaciones erosionadas. Su morfología se aproxima a las descripciones típicas de *Bathichnus paramoudrae* Bromley, Schultz & Peake, 1975. En la sección expuesta sólo se ven trazas de perforaciones tubulares que podrían corresponder a un trazado sinuoso de lo que resta del cordón axial. Las ramas laterales han sido erosionadas y vaciadas. Perpendicular al corte se aprecian varias perforaciones tubulares verticales. El paramoudra citado está expuesto en un bloque desprendido, ahora en disposición vertical, pero originalmente debió yacer subhorizontalmente. Así, el eje mayor del paramoudra tenía en origen un trazado subhorizontal, con ramificaciones laterales y continuaciones o raíces verticales. Otra interpretación posible es que la geoforma observada se deba a coalescencia de varias ramas verticales contiguas, que resultan conjugadas sobre el plano subhorizontal observable.

Otro ejemplo próximo de paramoudra, de 1,8 m de largo x 0,6 m de ancho, con menor número de perforaciones tubulares discernibles, adopta una disposición que recuerda a vértebras superpuestas, y ligeramente desplazadas unas de otras. La figura vertebrada está contorneada por límites externos más ovoides. Pensamos que también puede ser interpretado como coalescencia de formas, o incluso pudiera tratarse de concreciones sin ichnofósiles más que de un auténtico Paramoudra. En todo caso esta discusión de la presencia de formas intermedias será retomada más adelante, tras presentar los hallazgos de Jaizkibel.

PARAMOUDRAS EN JAIZKIBEL 2 Y SU CONTEXTO

En la segunda localidad de Jaizkibel (que denominamos Jaizkibel 2), se encuentran ejemplos comparables a los de Jaizkibel 1 (la localidad previamente descrita en GALAN & MOLIA, 2008) más otros ejemplos de Paramoudras singulares, junto a una enorme profusión de Paramoudras conjugados y grandes magmas. En realidad la localidad 2 es la prolongación hacia el SW, tras varios escarpes, de la 1, por lo que ocupa una posición stratigráfica más elevada. En conjunto, ambas localidades abarcan una potencia total del orden de 20-25 m. Los estratos de arenisca, de 1 á 5 m de espesor, quedan escalonados y separados por intercalaciones de lutitas dispuestas en bancos delgados (el mayor de unos 40 cm de espesor). El dispositivo es monoclinial, de bajo ángulo, buzante 15-25° hacia el WNW. Lateralmente la erosión marina ha recortado los distintos estratos generando una serie de prominencias o pequeños cabos en la línea de costa.

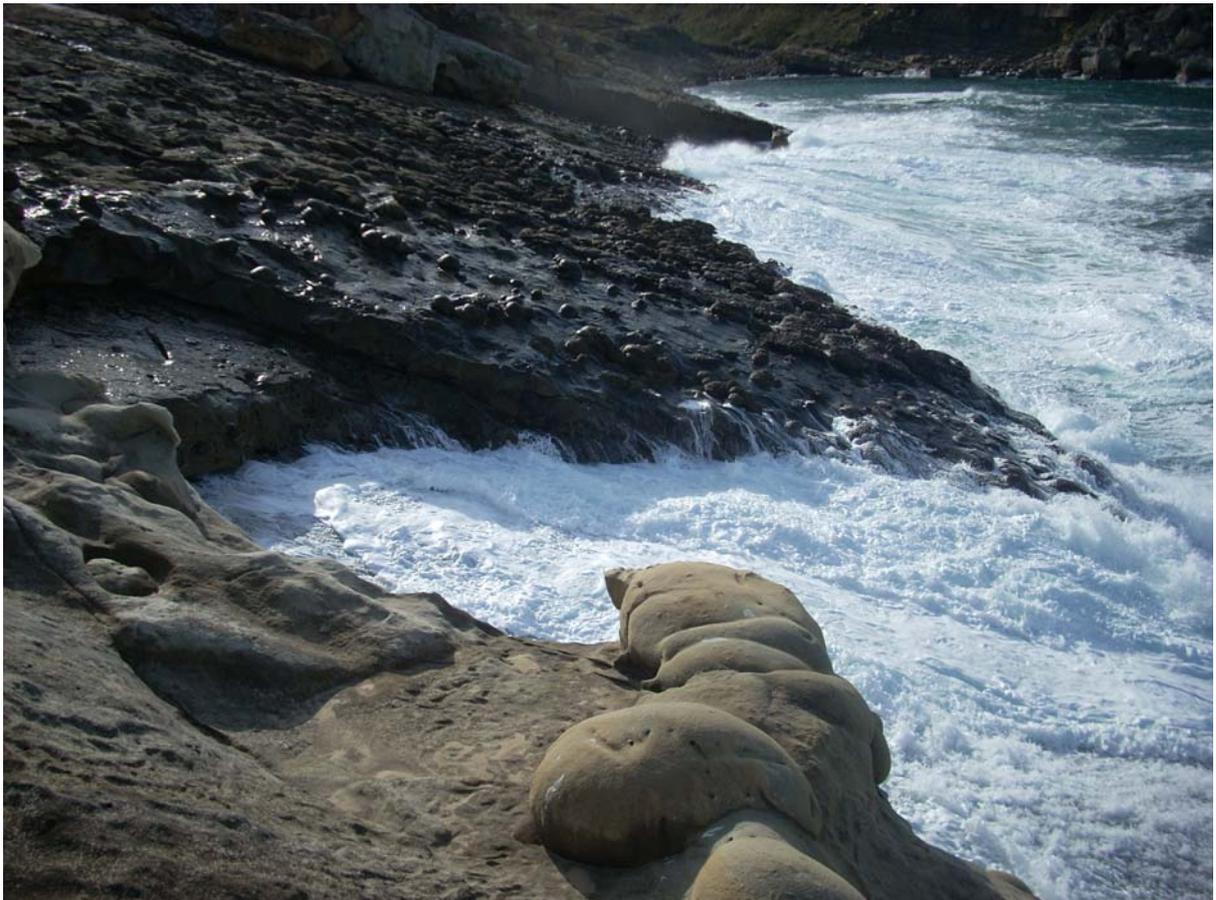
El afloramiento con Paramoudras de Jaizkibel 2 conforma una laja costera, con varios escalones, de unos 150 m de largo x 20-40 m de anchura. Su parte inferior queda cubierta en marea alta y está expuesta a la acción del oleaje. En la zona superior, los Paramoudras escasean progresivamente y dan paso a estratos más arenizados o con cobertura vegetal. Algunos bloques arenizados poseen ejemplos de concreciones con envolturas de óxidos de hierro. La cantidad y variedad de Paramoudras es enorme, existiendo sectores con hasta más de 10 geoformas por m². Las fotografías anexas ilustran mejor que mil palabras la indescriptible diversidad existente, la cual trataremos de exponer ordenadamente en los siguientes apartados.

PARAMOUDRAS ESFERICOS

Existe un alto número de Paramoudras esféricos, que casi podríamos decir son las formas predominantes. Sus tamaños van de 10-20 cm á algo más de 1 m de diámetro (promedio en torno a 55 cm) y en muchos casos su esfericidad es notable. Normalmente están diferenciados pero sólidamente unidos a la matriz de arenisca adyacente. Aunque recuerdan a cannonballs, un examen atento muestra que poseen orificios (con espículas o estructuras perforantes que los prolongan) tanto sobre el polo superior como muchas veces varios laterales. Pueden estar aislados pero también se presentan anastomosados lateralmente con otros, de igual o distinto tamaño. A veces su unión conforma figuras (gusanitos, tortugas) similares a las descritas para Jaizkibel 1. Presentan envolturas o gangas que los separan de la matriz, pero poco conspicuas. Su forma resulta engañosa porque en realidad lo que afloran son semiesferas o en todo caso 3/4 de las esferas, que uno tiende a suponer que deben ser esféricas. Un examen más atento revela que en la mayoría de las ocasiones estas "esferas" se prolongan (vertical o lateralmente) a través de raíces o brazos cilíndricos, de menor diámetro, los cuales se hunden en el sustrato.



Paramoudras esféricos individuales y anastomosados en Jaizkibel 2. Algunas esferas están unidas a otras; en otros casos están incluidas o recubiertas por magmas de concreciones mayores, de las cuales emergen. Puede apreciarse la existencia de algunas gangas o envolturas arcillosas más blandas.



Paramoudras en Jaizkibel 2 sometidos a la acción del oleaje, muy potente en el Cantábrico. Su relieve positivo muestra que son muy resistentes a la erosión y sugiere un alto contenido silíceo en sus cementos. En la imagen superior quedan residuos de gangas de esferas desprendidas; en la inferior un gran Paramoudra sub-cilíndrico, de 2,5 m de longitud, formado por coalescencia de esferas contiguas.

Por otro lado, las “esferas” resultan muy resistentes a la erosión (se aprecia muy bien en aquellas sometidas al oleaje y a una acción continuada de las mareas), por lo que sospechamos que su cementación es más silíceas que carbonatada -a diferencia de los cannonballs-. Aspecto éste que requiere ser confirmado y cuantificado, con analítica más afinada.

El número de orificios es generalmente bajo y existen ejemplos donde las perforaciones prosiguen el tubo axial en surcos sobre el sustrato adyacente, para hundirse en él a través de otros orificios.

Hay que tener también en cuenta que lo que observamos es lo que queda en relieve positivo sobre la laja costera, tras haber sido paulatinamente rebajado el sustrato de la arenisca que contiene los Paramoudras por la erosión y meteorización superficiales. En las zonas más próximas al mar, periódicamente inundadas, las esferas se disgregan y presentan múltiples orificios y concavidades debidas a la acción actual de organismos vivos perforadores e incrustantes del bentos litoral. Tales rasgos no guardan relación con los orificios de los Paramoudras debidos a ichnofósiles.

En estratos de los escarpes superiores hay Paramoudras esféricos, con orificios laterales, obviamente sostenidos por brazos laterales, subhorizontales. Cabe también decir que sobre la laja principal, en su parte más alta estratigráficamente, próxima a un contacto con lutitas, los Paramoudras esféricos tienden a adoptar formas discoidales, más aplanadas.

Algunos de los ejemplos descritos de esferas anastomosadas pueden ser considerados, desde un punto de vista ichnológico, afines aunque no iguales al ichnotaxón *Bathichnus paramoudrae* Bromley, Schultz & Peake, 1975. Otros ejemplos se aproximan a *Paratísoa contorta* Gaillard, 1972. Pero en la mayoría de los casos están faltando datos, tanto para atribuirlos a ichnotaxa ya descritos, como para describir nuevas ichnoespecies, ya que aunque se puede describir muy bien la concreción, se conoce muy poco de la traza fósil de los tubos. Este aspecto será comentado con mayor extensión en otro apartado.

PARAMOUDRAS CILINDRICOS

Las formas cilíndricas comprenden varios tipos. Las más abundantes son Paramoudras cilíndricos que emergen del piso con forma de senos o terminaciones semiesféricas, de unos 10-20 cm de diámetro. Poseen orificios centrados en su polo superior. Hay ejemplos también de desarrollos subhorizontales y oblicuos con orificios en sus terminaciones. Pueden presentar gemaciones laterales, con otros orificios, y hay evidencia de que en estos casos el tubo central posee ramificaciones laterales acodadas (bifurcaciones en Y o en T). Han sido observados ejemplos de 80 cm de extensión vertical y hasta más de 2 m de largo en formas oblicuas y subhorizontales.

Le siguen en abundancia formas cilíndricas subhorizontales más delgadas (5-10 cm de diámetro), de hasta 1,5 m de largo. Sus terminaciones semiesféricas son más agudas, a veces algo cónicas, y presentan orificios centrados sobre su eje axial. En ejemplos muy separados del sustrato se aprecia que o bien se hunden oblicuamente o pueden presentar raíces verticales. Igualmente pueden poseer ramas laterales cortas en T. En ocasiones atraviesan o se fusionan con magmas mayores.

Un tercer tipo comprende cilindros verticales gruesos (de 20-25 cm), menos numerosos, y habitualmente seccionados, por lo que no es posible apreciar ni su terminación superior (seccionada) ni su base (que se hunde verticalmente en el sustrato), sino sólo cortos tramos del orden de 40 cm de altura. Poseen un tubo axial centrado, sin ramificaciones. Entendemos que lo que vemos es un fragmento de Paramoudras más extensos.

Como en el caso anterior, algunos ejemplos parciales pudieran adscribirse a *Bathichnus paramoudrae* o a *Bathichnus* isp. Pero lo más probable es que constituyan ichnotaxa nuevos.

Un caso particular de Paramoudra subcilíndrico, que informalmente denominamos “balones de rugby”, consiste en concreciones subhorizontales muy separadas del sustrato (sólo una pequeña área de unión en su base), con forma de balón de rugby o de berenjena, ligeramente arqueado, de unos 20-25 cm de largo x 5-8 cm de diámetro. Presenta perforaciones (con o sin espícula) en ambas terminaciones. Sus cordones axiales se unen en Y en la parte central y se hunden en tubo único verticalmente bajo el sustrato. Esto es perfectamente apreciable en una muestra seccionada del sustrato. Precisamente, la zona de unión al sustrato es donde el tubo axial se hunde en vertical; en el corte de separación de la muestra se aprecia la continuidad vertical de un único tubo axial. Creemos que en otros Paramoudras también ocurre esto, es decir, que los tubos axiales se prolongan en vertical más o menos en el centro de la zona de contacto con el sustrato.

PARAMOUDRAS EN ANFORAS Y ESPONGIFORMES

Otros Paramoudras de Jaizkibel 2 se asemejan a ánforas o esponjas y champiñones, generalmente son gruesos (20-40 cm de diámetro) y con desarrollos verticales de hasta 0,5 m. Pueden estar meteorizados en diverso grado, pero habitualmente se aprecia un orificio central, de mayor diámetro, y uno o varios laterales, de diámetros menores. El orificio central puede ampliarse considerablemente por erosión superficial, otorgando a la concreción el aspecto de una esponja o cántaro hueco. En algunos ejemplos se aprecian dos cordones axiales, paralelos o con desarrollo helicoidal. Algunos de ellos podrían ser atribuidos a *Caletichnus complicatus* Breton, 2006 o a *Bathichnus* isp.



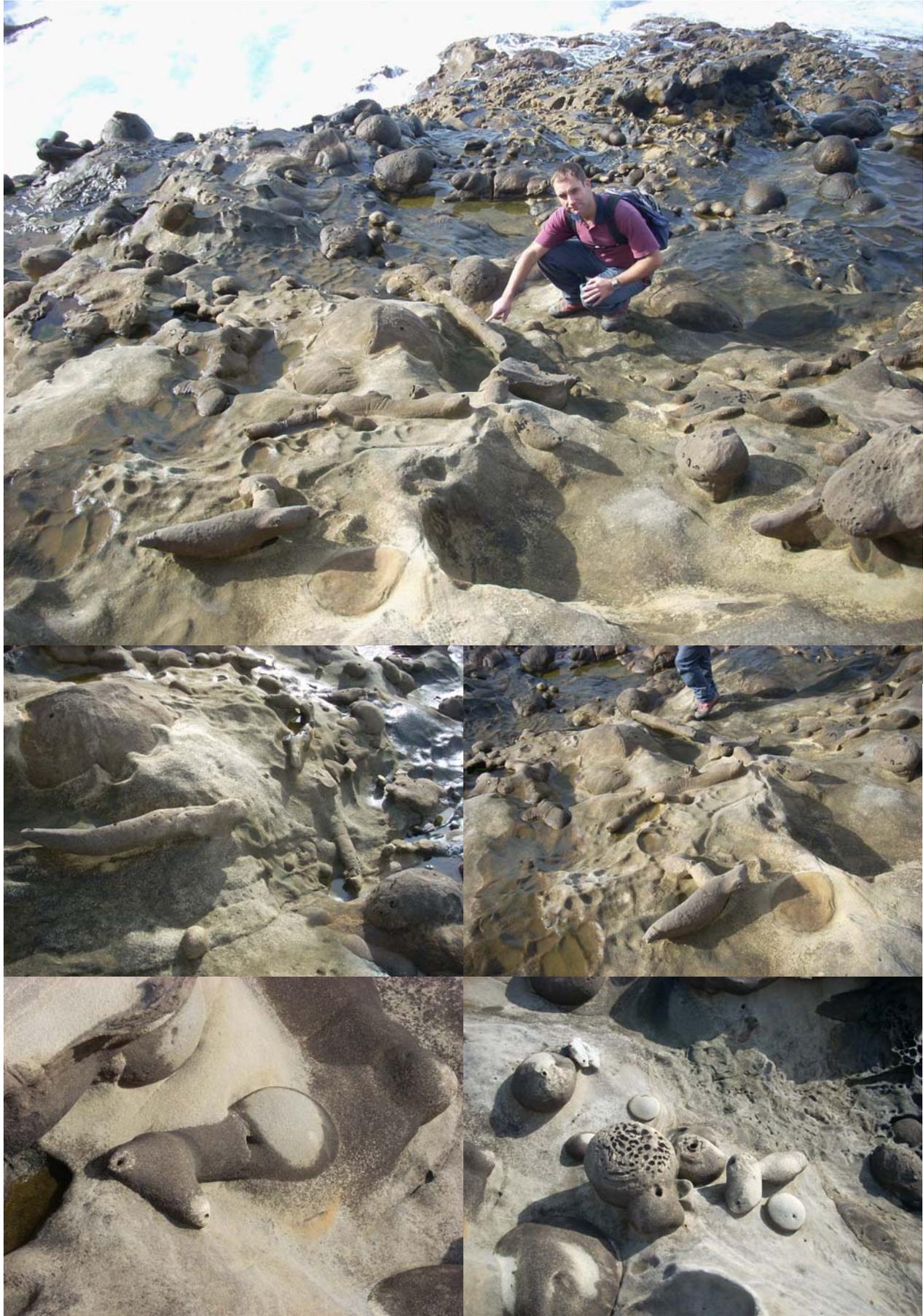
Paramoudras esféricos y cilíndricos. Algunos afloran del piso con terminaciones semiesféricas que recuerdan a senos. Otros discurren subhorizontalmente. Nótese los orificios centrados en las terminaciones axiales, más otros en disposición lateral. Y la coalescencia o aglutinación de formas, en masas irregulares, de complejo diseño. Algunos orificios han resultado ampliados por erosión.



Paramoudras cilíndricos subhorizontales y oblicuos anastomosados o recubiertos por magmas mayores. Nótese los distintos diámetros, la localización de orificios en las terminaciones axiales, y otros laterales.



Diversidad de formas en los Paramoudras de Jaizkibel 2. Algunos cilindros verticales gruesos pueden estar seccionados naturalmente en su parte superior por impactos. Predominan las terminaciones semiesféricas y existen múltiples formas anastomosadas y con gemaciones o ramificaciones diversas.



En algunos sectores además de esferas se encuentra gran número de formas cilíndricas delgadas y subhorizontales, con terminaciones semi-cónicas. Muchas presentan bifurcaciones en Y o en T, y raíces verticales que se hunden en el sustrato. Algunas geoformas algo oblongas pueden corresponder a la parte inferior de trazas en U. El Paramoudra central de la imagen inferior derecha, posee múltiples agujeros de erosión superficiales, sin continuidad con perforaciones verticales, estando éstas en bajo número.

MASAS ANASTOMOSADAS Y MAGMAS

La complejidad de geofomas en los Paramoudras de Jaizkibel 2 aumenta cuando se observan masas de Paramoudras anastomosados unos a otros, o envueltos por concreciones mayores (diferenciadas de la matriz o sustrato). Ejemplos de varios tipos pueden presentarse fusionados o incluidos en concreciones mayores, en forma compleja, como se ilustra en las fotografías. Hay además masas irregulares o magmas que recubren o contienen Paramoudras individuales menores. En algunas ocasiones recuerdan a los Paramoudras más grandes de Jaizkibel 1, en formas de ristas globulares, unidas unas a otras, pero aparentemente debidas a una secuencia de eventos de concrecionamiento. Los casos en que la erosión hace aflorar de los magmas a Paramoudras menores, en cierto modo ponen de manifiesto que pueden existir diferencias de compacidad, grado o tipo de cementación, y resistencia ante la erosión, entre unos y otros. Las concreciones envolventes parecen ser comparativamente más blandas, pero también hay ejemplos que sugieren consistencias similares, en cuyo caso la diferencia puede ser atribuida a que sus concrecionamientos son sucesivos en el tiempo y no distintos litológicamente. Para el Paramoudra el tubo del ichnofósil actuó de núcleo aglutinante, y posteriormente el o los Paramoudras actuaron de núcleo aglutinante para la concreción del magma, algo posterior en el tiempo, aunque no lo suficiente para apartarse de la zona límite del gradiente redox, y obviamente en momentos tempranos de la diagénesis del conjunto rocoso.

PISTAS FOSILES

Antes de describir los siguientes tipos, queremos introducir un aspecto conexo. Debido a que los ichnofósiles son los restos fósiles de tubos o madrigueras de organismos marinos, constructores de tubos en el sedimento o excavadores, es posible que si se conservan pistas fósiles de los mismos puedan decirnos algo más acerca de los organismos y su biotopo de vida.

En los estratos de lutitas intercalados en la serie, y sobretodo en la base de los estratos de arenisca en contacto con las lutitas, es frecuente que se conserven pistas fósiles. Generalmente la arenisca presenta en posición invertida el contramolde en relieve positivo de la huella negativa dejada por los organismos que se encontraban en las arcillas ahora litificadas como lutitas. En las fotografías anexas mostramos ejemplos hallados en distintos puntos de Jaizkibel, pero fuera del área de estudio. En ellas Luis Viera (com. pers.) ha identificado ejemplares de: *Subphyllocorda*, *Musteria bicornis*, *Fucoides* y otros indeterminados. En adición señala que son frecuentes ejemplos de *Zoophycus* y muchos otros taxa. Aunque también en este caso se sabe de las huellas y no de los organismos en sí, creemos que la proliferación de organismos en el fango (en estratos de poco espesor) es considerablemente mayor que la de organismos tubícolas y excavadores que se entierran en la arena, un medio de alta energía, mucho más dinámico, que ofrece menor protección. No obstante, en ambos casos, los organismos pueden generar considerables cantidades de materia orgánica (como producto de su metabolismo y descomposición de sus restos). Por ello pensamos que el contenido orgánico (y el número de organismos) se multiplica en la parte superior de los estratos arenosos. Y dado que de una forma u otra es el contenido orgánico el que propicia el concrecionamiento en torno al límite oxígeno-anóxico, planteamos la hipótesis de que una mayor cantidad y diversidad de organismos puede haber propiciado la formación de Paramoudras con alto número de ichnofósiles. Que es lo que hemos hallado en los ejemplos que presentamos en los siguientes apartados. Al menos esto pueda aportar una explicación de tal multiplicidad, auténtica explosión, de perforaciones tubulares en estas concreciones.

PARAMOUDRAS MULTIPERFORADOS

En un sector de la parte superior del afloramiento de Jaizkibel 2 encontramos Paramoudras cuya forma en planta recuerda al de Igueldo (forma irregular extendida horizontalmente, con bordes festoneados, de hasta varios metros de largo) y que destacan del sustrato con escasos centímetros de elevación y topes subaplanados, paralelos a la estratificación. Estos Paramoudras están acibillados por decenas a centenares de perforaciones, en forma intrincada y compleja. Al mismo nivel estratigráfico, otros Paramoudras esféricos y cilíndricos, presentan un alto número de perforaciones, considerablemente mayor que el patrón habitual. A escasos 20 cm por encima de este nivel se encuentra el contacto con una intercalación de lutitas interestratificadas. Creemos que la presencia de dicho nivel de lutitas explicaría el mayor contenido orgánico del tramo superior del estrato de arenisca en que se encuentran los Paramoudras citados, obviamente perforados o con auténticos enjambres de organismos excavadores. Algunos de ellos cuyo número de perforaciones verticales disminuye hacia abajo podrían ser atribuidos a *Felderichnus multiturbae* Breton, 2006, otros a *Bathichnus paramoudrae* Bromley, Schultz & Peake, 1975.

En adición, estos ejemplos nos hacen apartar de la idea simple de que las concreciones que constituyen los Paramoudras se organizan en torno a tubos de organismos individuales, con una estrecha correspondencia entre el tubo axial del ichnofósil y la concreción silíceas que lo rodea. Más bien nos lleva a reflexionar que el concrecionamiento puede organizarse a lo largo del gradiente redox abarcando tanto un único organismo como varios e incluso sus producciones y desechos. Una suma de grumos de materiales orgánicos, que incluyen tubos o madrigueras de animales, pero no sólo estos, y en forma más compleja



Profusión y diversidad de Paramoudras. Hay formas serpentiformes que atraviesan el sustrato, cilindros verticales cortos (a veces con 2-3 perforaciones en paralelo o levemente helicoidales), formas esféricas y en balón de rugby, aislados o anastomosados. El ejemplar en balón de rugby de la segunda fila izquierda está erosionado (con espícula dentro del orificio izquierdo y vacío en el orificio derecho), por lo que se puede apreciar el tubo envolvente del cordón, de color blanco en este caso.



Otros ejemplos de Paramoudras en Jaizkibel 2, simples o conjugados en esculturas complejas: ánforas o esponjas, cilindros y gusanos, hay quien distingue hipopótamos, elefantes, tortugas, focas, caras de zorro y ornitorrincos. No le falta imaginación a la naturaleza (o a quienes la observan).



Paramoudras con formas cilíndricas verticales y horizontales, junto a otras esféricas. El cilindro truncado de las dos imágenes superiores posee dos cordones axiales, ligeramente helicoidales. Nótese en la imagen inferior derecha un mayor número de perforaciones en las geofomas, en posición estratigráfica próxima a un contacto con lutitas.



Pistas fósiles en estratos delgados de lutitas intercalados en la serie y base de los estratos de arenisca en contacto con las lutitas, de varias localidades de Jaizkibel, pero fuera del área de estudio. Generalmente la arenisca presenta en posición invertida el contramolde en positivo de la huella dejada por los organismos sobre las arcillas ahora litificadas como lutitas. En las fotografías superiores, el trazo doble corresponde a ejemplares de *Subphyllocorda* y las formas más pequeñas que terminan como un interrogante a *Musteria bicornis*. Las imágenes intermedias corresponden a *Fucoides* y las inferiores a otros ejemplos de *Subphyllocorda* y *Fucoides*. En otros lugares de Jaizkibel son también frecuentes ejemplos de *Zoophycus* y otros ichnotaxa.

que lo habitualmente considerado, con todo lo cual puede relativizarse mucho el propio concepto de clasificación sistemática basada en los ichnofósiles. El tema será retomado en la discusión.

PARAMOUDRAS DECAPITADOS Y ESTRELLADOS

En el mismo sector sobre una amplia superficie apenas 2-5 cm por encima del nivel anterior se encuentra gran número de Paramoudras decapitados o seccionados, prácticamente a igual nivel que el suelo adyacente. Sus formas son irregulares, festoneadas, con escasos orificios y longitudes horizontales de hasta 5-6 m x unos 40 cm de anchura. Su interrupción planar coincide con el límite inferior de un estrato delgado de lutitas. Esto sugiere que, o bien el desarrollo vertical de los Paramoudras se interrumpe al faltar las arenas, o bien, en caso de que las concreciones se extendieran hasta las arcillas, éstas porciones han sido erosionadas y removidas en su totalidad. Algunos rasgos se asemejan por su desarrollo espacial a *Bathichnus paramoudrae* y a *Megagyrolithes ardicensis* Gaillard, 1980, o más precisamente, a tramos horizontales de los mismos, decapitados en paralelo a la estratificación.

En este nivel o un poco por debajo del mismo hay ejemplos de surcos y perforaciones, sobre la superficie plana de la laja costera, con forma de diseños estrellados. Una parte central con un haz de perforaciones verticales es rodeada por surcos radiales, rectilíneos, de hasta 50 cm de longitud. A un nivel estratigráfico ligeramente inferior, los surcos radiales más grandes consisten en Paramoudras cilíndricos horizontales, similares a los Paramoudras cilíndricos de menor diámetro (citados en un apartado previo), cuya envoltura externa está parcialmente erosionada y fragmentada. Es decir, que probablemente las formas estrelladas son los restos decapitados de delgados cilindros horizontales, con raíces verticales que se hunden en el sustrato.

GANGAS Y ANILLOS DE LIESEGANG

Entre los Paramoudras de Jaizkibel 2 son escasas las gangas o envolturas de menor densidad, entre las concreciones de los Paramoudras y la roca caja. Estas en cambio son muy abundantes en Jaizkibel 1, especialmente en torno a formas esféricas. En ambos casos y sobretodo en concavidades de escarpes verticales o techos de abrigos, las envolturas o gangas que restan de las esferas, presentan ejemplos de diseños en bandas o anillos concéntricos, de tonos alternos rojizos, anaranjados y amarillentos. Un examen atento revela que su disposición no es concéntrica con respecto a la esfera central, sino sobre el residuo más o menos plano o ligeramente cóncavo remanente. Luis Viera (com. pers.) llamó nuestra atención de que estos bandeados son conocidos en muy distinto tipo de rocas porosas (tobas volcánicas, ignimbritas y particularmente en areniscas) y son denominados Anillos de Liesegang ó Liesegang banding.

La noción de anillos de Liesegang se usa ampliamente para describir patrones naturales en forma de franjas paralelas o concéntricas, alternas. Los mismos son formados por precipitación de líneas con alto contenido en minerales de hierro (p.ej.: hematita, limonita, goethita, etc.). Las bandas precipitan por difusión a lo largo de un simple gradiente químico durante un evento. En las rocas, con diferentes sets de bandas, es el resultado de precipitación por movimiento del agua intergranular y pueden ocurrir en varios eventos a lo largo del tiempo, incluso con disolución de los sets más antiguos. La mineralización de hierro a lo largo de estas bandas parece ser inducida por la presencia de interfaces redox (cambios de condiciones reductoras a oxidantes en el agua intergranular) o interfaces de pH (cambios en acidez). La fuente de hierro puede ser la presencia de núcleos o inclusiones de pirita.

En nuestro caso los ejemplos de anillos de este tipo se han formado en remanentes de las envolturas de los Paramoudras, pero en localizaciones en las cuales la arenisca ha experimentado procesos pseudokársticos de disolución intergranular y arenización. Ello ha permitido incrementar la porosidad y permitir la difusión y precipitación concéntrica de los minerales de hierro a partir de las sustancias disueltas contenidas en el agua intergranular. Es por tanto un proceso pseudokárstico pero resultado a su vez de la formación de los Paramoudras y sus envolturas, en los cuales, las fracciones arcillosas no quedan en la concreción silícea sino preferentemente rodeando a la misma y separándola del sustrato adyacente.

CONCRECIONES DE OXIDOS DE HIERRO

Otras concreciones de óxidos de hierro en Jaizkibel se forman también en bloques arenizados de la parte superior de la secuencia. En tales bloques y estratos, con paredes arenizadas por disolución pseudokárstica intergranular, son comunes concreciones circulares, irregulares y en láminas, formando costras duras con alto contenido en óxidos de hierro y aluminio. Las costras, anillos y capas, generalmente de pocos milímetros de espesor, poseen a ambos lados arenisca arenizada.

También se encuentran ejemplos de láminas resistentes, probablemente de óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, en las envolturas que rodean a Paramoudras esféricos. Hay ejemplos de capas duras con alto contenido en hierro, de unos 5-8 mm de espesor, ocupando el centro de la ganga arcillosa de separación entre la concreción del Paramoudra y la roca-caja.



Paramoudras multiperforados (imagen superior) y decapitados (imagen inferior). Poseen formas irregulares extendidas en planta subhorizontalmente, con bordes festoneados. Los primeros destacan del sustrato con escasos centímetros de elevación y topos subaplanados, paralelos a la estratificación. Los segundos, están situados apenas unos centímetros más altos (estratigráficamente), prácticamente a igual nivel que el suelo adyacente.



Paramoudras estrellados y formas discoidales subaplanadas. Los radios de las formas estrelladas son surcos, mientras que en la parte central se abren algunos orificios verticales. En la imagen inferior, al fondo, intercalación de lutitas erosionadas y parcialmente removidas. Este nivel intercalado limita la formación de Paramoudras.



Paramoudras decapitados, subplanados y multiperforados. En la imagen superior se aprecia lo que parece un marcado plano de estratificación, que en realidad es una intercalación delgada de lutitas parcialmente removida por erosión. El tope de las formas decapitadas y subplanadas corresponde al nivel del contacto con las lutitas. En la segunda fila derecha se aprecia que las formas estrelladas son los restos erosionados de cilindros rectos. Nótese la disminución de las perforaciones en otras geoformas a medida que aumenta su separación con el nivel de lutitas.



Concreciones y envolturas de óxidos de hierro en paredes arenizadas, y anillos de Liesegang en remanentes de gangas de Paramoudras. Los primeros corresponden a la parte superior del afloramiento de Jaizkibel 2 y los segundos a abrigos pseudokársticos en Jaizkibel 1.

GRADIENTE REDOX Y CONCRECIONAMIENTO

En las turbiditas emplazadas en la zona abisal, entre 1.500 y 4.000 m de profundidad para la Formación Jaizkibel, la materia orgánica contenida entre las arenas (y la que prosiguiera cayendo como detritos planctónicos o como restos de organismos de la infauna del bentos), iba siendo alterada por la presencia de poblaciones de bacterias. A partir de la interfase agua-sedimento del fondo submarino se suceden verticalmente: una zona aerobia, una zona de sulfato-reducción y a una zona de metanogénesis. Entre el fondo marino y la zona de metanogénesis se organiza un gradiente redox, con cierto número de equilibrios químicos. Es aceptado que las concreciones silíceas de los Paramoudras se forman en torno a la zona de frontera oxígeno-anóxica. A su vez, entre los tubos o madrigueras de los organismos y el sedimento contiguo, se organiza otro gradiente redox a tenor del sentido de circulación de las aguas, pudiendo tanto hundirse agua rica en oxígeno hacia la zona anóxica profunda del sedimento o, a la inversa, ascendiendo hacia la superficie agua rica en sulfuros que atraviesa las zonas oxigenadas del sedimento. ZILJSTRA (1995) y CLAYTON (1986) han propuesto hipótesis alternas (representadas en la Figura 1), según las cuales los Paramoudras serían formados en torno a los tubos, bien por encima o debajo de la frontera oxígeno-anóxica. En nuestra opinión, los equilibrios químicos en esta zona de frontera estarían controlados en la Formación Jaizkibel por la interferencia resultante entre ambos gradientes. Ello explica que pueda haber fases sucesivas de concrecionamiento en el mismo nivel. Tras formarse los Paramoudras iniciales, puede llegarse a un nuevo equilibrio en que precipitan otros secundarios contorneando o envolviendo a los primeros. Igualmente ello es consistente con la coalescencia o anastomosis observada entre varios de ellos, al mismo nivel. De ello también se deduce que los tubos en sí deben estar con frecuencia incompletos, no concrecionándose las zonas altas o bajas alejadas de la frontera redox, por lo que los ichnofósiles serían trazas incompletas en la generalidad de los casos.

SEDIMENTACION Y DIAGENESIS DE PARAMOUDRAS EN LAS TURBIDITAS

El espaciamiento vertical de los lechos con Paramoudras parece estar controlado por la ciclicidad de los depósitos (JUIGNET & BRETON, 1994). La Formación Jaizkibel es un depósito de turbiditas (en forma de abanicos de deyección submarinos), emplazadas en un surco E-W, en la parte distal de la zona de rifting pirenaico. Las descargas detríticas de cañones submarinos y slumps procedentes del N (Plateau de Las Landas) coexistían con aportes axiales alimentados desde el E (CAMPOS, 1979), con el resultado de una alta tasa de sedimentación. Dividiendo el espesor medio de los sedimentos en una región particular por el lapso de edad que abarcan los depósitos (determinado a partir de evidencia paleontológica o paleomagnética) se obtienen las tasas de sedimentación. En general la tasa de sedimentación en los océanos es mucho mayor en las fosas que en las cuencas oceánicas, y particularmente alta en el borde de los márgenes continentales activos, donde son frecuentes las corrientes de turbidez (KEMPE, 1981). En este tipo de fosas o surcos profundos la tasa de sedimentación alcanza en promedio valores de $2.000 \text{ mm} / \text{ty}^{-1}$ (siendo $\text{ty}^{-1} = 1.000$ años). En épocas glaciares se ha calculado tasas de $3.500 \text{ mm} / \text{ty}^{-1}$ durante los períodos glaciares y de $200-300 \text{ mm} / \text{ty}^{-1}$ durante los interglaciares (BERGER, 1974). La secuencia del flysch Eoceno de Jaizkibel contiene más de 1.500 m de espesor de sedimentos, por lo que puede estimarse una tasa media de sedimentación del orden de $500-1.000 \text{ mm} / \text{ty}^{-1}$, con valores que localmente pueden ser más altos. Aunque probablemente alternaron episodios de sedimentación rápida (debido a las descargas turbidíticas) con extensos lapsos de mayor calma y sedimentación pausada, en conjunto puede estimarse una ciclicidad de los aportes sedimentarios. En la zona abisal en que se encontraban emplazadas las turbiditas, la frontera redox estaba situada a poca distancia del fondo marino, probablemente a entre 0,5 y 1 m de profundidad. Con cada sucesivo aporte sedimentario, el límite redox se desplazaría hacia arriba. A los Paramoudras formados en un nivel, seguiría la formación de otros en niveles superpuestos, correlativos al aumento de espesor del sedimento y a los desplazamientos verticales del límite redox.

Si pensamos en progresivas descargas de arena ($1-2 \text{ m}$ de espesor cada $1-2 \text{ ty}^{-1}$) resulta obvio que estos lapsos de tiempo no guardan relación alguna con el lapso de vida de organismos individuales, ni tan siquiera con sucesivas generaciones producto de su reproducción. El proceso físico-químico de concrecionamiento en los Paramoudras es rápido, por lo que debe ocurrir que cada fase de formación de Paramoudras refleja sólo la distribución de tubos de organismos y materiales orgánicos en la zona redox del sedimento en un momento dado. En otro sucesivo, será otra la distribución, con poblaciones o colonias distintas. Debido a que los Paramoudras tienen cierta extensión vertical, pueden ser encadenados como ramas o gemaciones sucesivas, poblaciones y concreciones distintas, no siendo necesario postular la existencia de largos organismos. Es probable que la mayoría de los Paramoudras pueda deberse a organismos de $10-50 \text{ cm}$ de longitud y tubos construidos por los mismos del orden de $1-2 \text{ m}$ de desarrollo vertical. Las ramificaciones horizontales igualmente pueden suponerse como producto de anastomosis de concreciones contiguas, y no de largos desarrollos de tubos u organismos, de hasta decenas de metros (actualmente el mayor reporte para *Bathichnus paramoudrae* alcanza $29,5 \text{ m}$ de desarrollo horizontal).

La buena preservación y dureza de los materiales en los Paramoudras de Jaizkibel es un obstáculo para observar la traza de los ichnofósiles, teniendo que ser inferida en gran medida a partir de la localización de los orificios, forma externa de las concreciones y algunas secciones naturales y experimentales. Estas últimas arrojan algo de luz sobre la complejidad de las trazas fósiles, aspecto que será comentado a continuación.

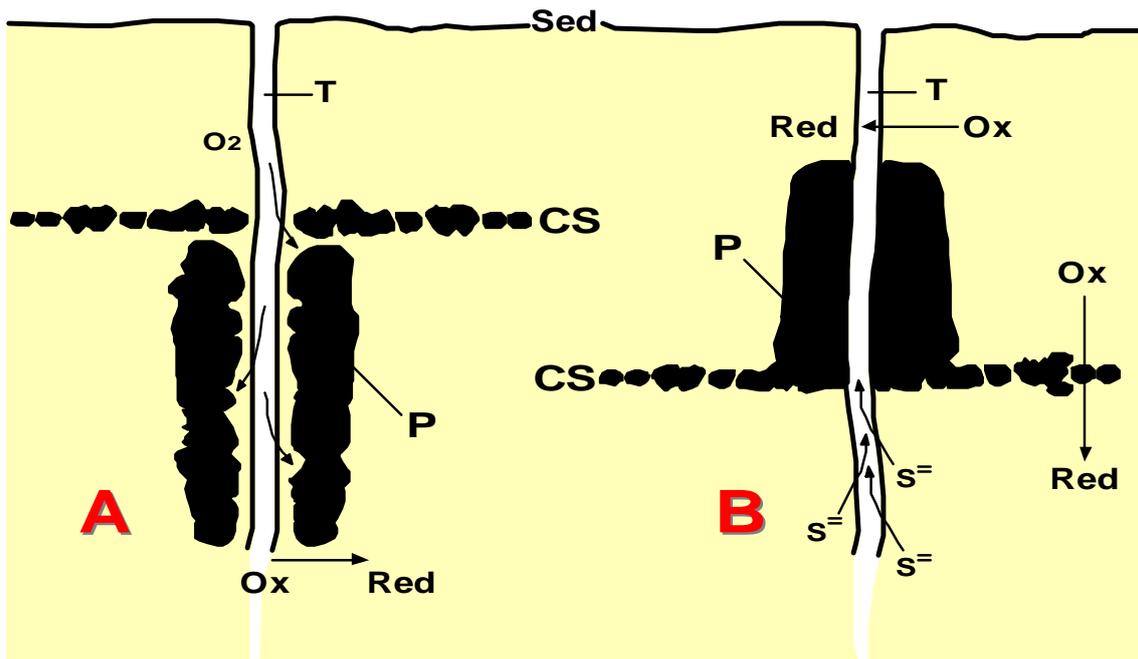


Figura 1. Formación de Paramoudras.

A: Hipótesis de ZILJSTRA (1995).

B: Hipótesis de CLAYTON (1986).

Concreciones silíceas en negro sólido. Las flechas Ox > Red indican los gradientes redox.

P = concreciones silíceas de los Paramoudras. CS = último lecho de concreciones silíceas.

Sed = superficie del sedimento. T = Tubos.

Las flechas curvas indican el tránsito de oxígeno (O_2) desde el tubo o madriguera hacia el sedimento (en A)

o de sulfuros (S^{2-}) desde el sedimento hacia los tubos. (Fuente: BRETON (2006), modificado).

Tanto desde una perspectiva diagenética (TOYTON & PARSONS, 1990; JUIGNET & BRETON, 1997) como geoquímica (CLAYTON, 1986; ZILJSTRA, 1995) cada vez resulta más claro que la silicificación de la concreción ocurre en una fase temprana y el papel preponderante es debido a la disolución de la calcita y precipitación de sílice en la frontera entre una zona oxidada superficial del sedimento y la zona profunda anóxica, rica en sulfuros. Las dos hipótesis, más que opuestas, son complementarias.





MUESTRA 1

Muestra 1. Detalle de extracción y corte experimental de una muestra de Paramoudra, de 8 cm de diámetro y 25 cm de largo. (A) Posición inicial, aflorando en una concavidad. Al excavar se aprecia un material más blando, margo arcilloso, en torno a la geoforma, la cual sólo está unida a la roca-caja mediante un "pedículo" latero-basal. (B) Parte seccionada del pedículo en la muestra tomada. (C) Resto del pedículo en la cavidad. Su sección es triangular, de 3 cm de ancho. (D) Corte efectuado en laboratorio, a 7 cm de la extremidad aflorante. (E) Vista en sección del corte. Se aprecia la funda en torno al cordón, cuyo interior parece de litología similar a la concreción externa. La estructura no posee bandas concéntricas, aunque sí pequeñas laminaciones. La diferencia entre la parte de aparente grano grueso y la lisa es debida a la irregularidad del corte, parcialmente fracturado.

SECCIONES CON RAMIFICACIONES

En algunas muestras ha sido observada o inferida la presencia de ramificaciones. En la muestra 4a se observa que de la rama principal de un Paramoudra cilíndrico (el cual posee un tubo axial y una gemación) sale una rama en Y que a su vez se desdobra terminando en dos orificios en la gemación. La sección de la muestra 4b es la continuidad inferior, donde las dos ramas del tubo axial se reúnen en tubo único. El color del cordón es verde oscuro.

En la muestra 2, esfera de 16 cm de diámetro, un corte ecuatorial (se pierden 2-3 mm de espesor del corte) permite ver fragmentos de cordón (manchas verdes), 2 en la mitad superior y 6 en la inferior, lo que puede ser interpretado como trazado sinuoso de un único cordón o como presencia de una o más ramificaciones.

En la muestra 5, esfera de 23 cm de diámetro y 17 kg de peso, un corte longitudinal permite apreciar cerca de lo que parecen restos de un agujero superficial, tramos de paredes del tubo axial que hacia el interior se diluyen en manchas verdes, posiblemente inclusiones aisladas de glauconita y aparentemente dispuestas en dos ramas. Pero admite también la hipótesis de un trazado sinuoso de un único cordón y/o de ramificaciones internas menores.

La muestra 13 corresponde a un Paramoudra en balón de rugby, con un claro ejemplo de bifurcación (forma intermedia entre T é Y). Uno de los orificios externos presenta espícula, el otro no. Ambas ramas se unen en la parte central para seguir en vertical profundizando en el sustrato, donde se aprecia el cordón único seccionado.

Las muestras 17 y 18 son esferas soldadas al sustrato que muestran, respectivamente, 4 y 2 orificios con cordón. Las secciones de unión al sustrato muestran un único punto de salida o raíz, con cordones verduzcos. Por lo tanto, deben existir ramificaciones internas.

La muestra 19 resultó por demás curiosa, ya que fue descubierta tras excavar lo que parecía el resto de una ganga arcillosa, circular, de 30 cm de diámetro. Se encontró primero trazas de un cordón (gris claro) y a 6 cm de profundidad una esfera de 12 cm, con una entrada del cordón y dos salidas inferiores; en una de ellas fue seguida la traza del cordón hasta su penetración en el sustrato inferior. Al lado del tubo gris se encontró también una inclusión de tonos blancos. La parte baja de la rama que penetra en el sustrato inferior deviene más delgada y blanca, con la consistencia de talco (posiblemente magnesita). Este curioso ejemplo muestra una ramificación en Y invertida, y además muestra que la ganga areno-arcillosa puede rodear por completo la concreción del Paramoudra.

Otros Paramoudras observados en superficie en el afloramiento de Jaizkibel 2, particularmente en forma de balones de rugby, y parcialmente erosionados, muestran en superficie orificios con espícula y tramos similares de cordón central blancuzco (de magnesita) muy similares a la muestra 13.

SECCIONES CON TUBOS AXIALES SIMPLES

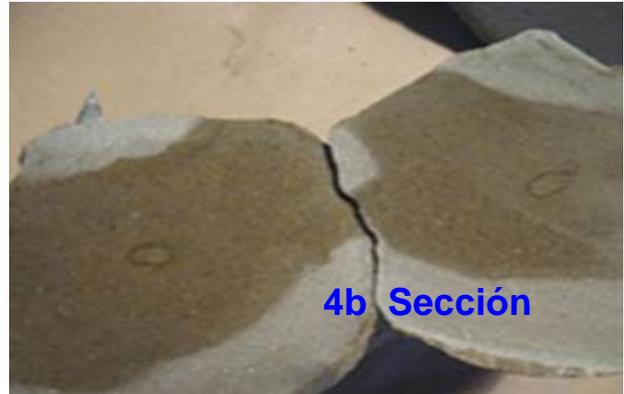
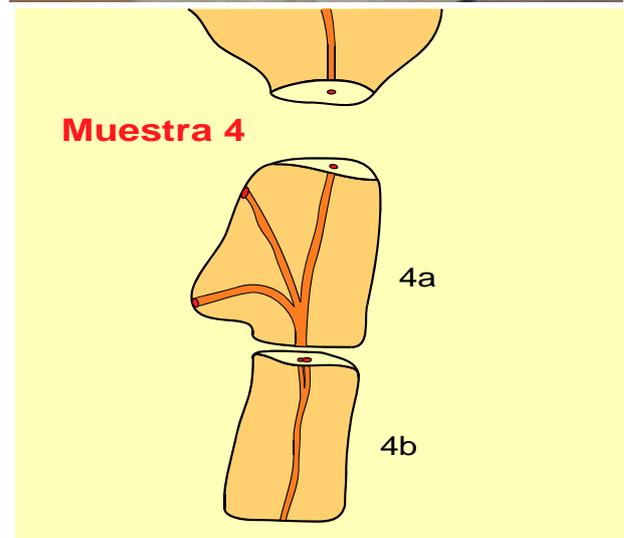
En otra serie de muestras sólo se aprecia, en sección transversal, tubos o cordones axiales simples. En los ejemplares soldados al sustrato hay datos de dos o más secciones, la efectuada para extraer las muestras, y los cortes de la muestra en laboratorio. Las muestras 1 y 6 corresponden a Paramoudras cilíndricos que afloraban del suelo en forma de senos, con orificio superior centrado en el polo axial. Los cortes muestran desarrollos de un tubo axial único, rectilíneo. En la muestra 1 (de 26 cm de longitud x 12 cm de diámetro) el tubo es visible en un corte a 2/3 de su longitud y parece salir también en su parte inferior; esta Paramoudra estaba unido al sustrato por un pedículo lateral, sin trazas de cordón. El 6 tiene forma de obús, con 20 cm de largo x 14 cm de diámetro, y estaba en profundidad casi seccionado del sustrato por una fractura horizontal; el cordón se aprecia centrado en la base y prosigue hacia el interior del sustrato. Los tubos o cordones, de colores verdosos a marrones, sugieren también alto contenido en glauconita.

Las muestras 3 y 7 corresponden a formas esféricas ligeramente oblongas, aunque la extracción de la 3 sugiere que es la extremidad de un cilindro; su sección muestra un tubo neto con cordón (mancha verde-negrucza) que prosigue en el sustrato. La 7 posee en superficie una depresión, ciega, mientras que al corte se aprecia la posible salida de un cordón (no verde sino marrón); posee una inclusión compleja, con una mancha blanca, nacarada, con posible contenido de magnesita. Cabe destacar que la ganga envolvente era de arena-arcillosa, muy compacta, y envolvía por completo la concreción.

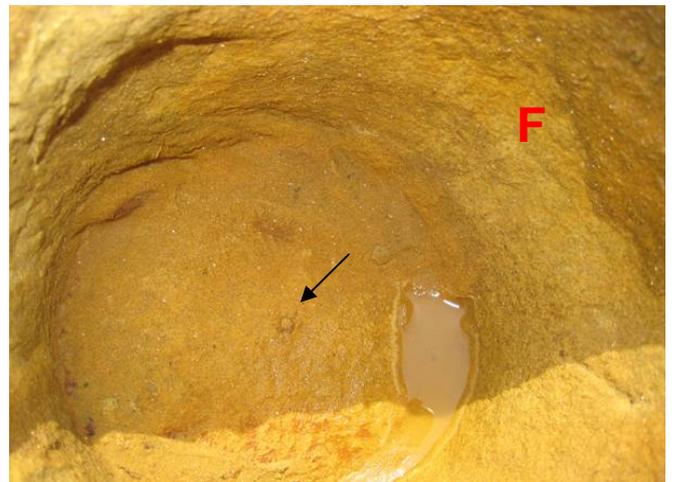
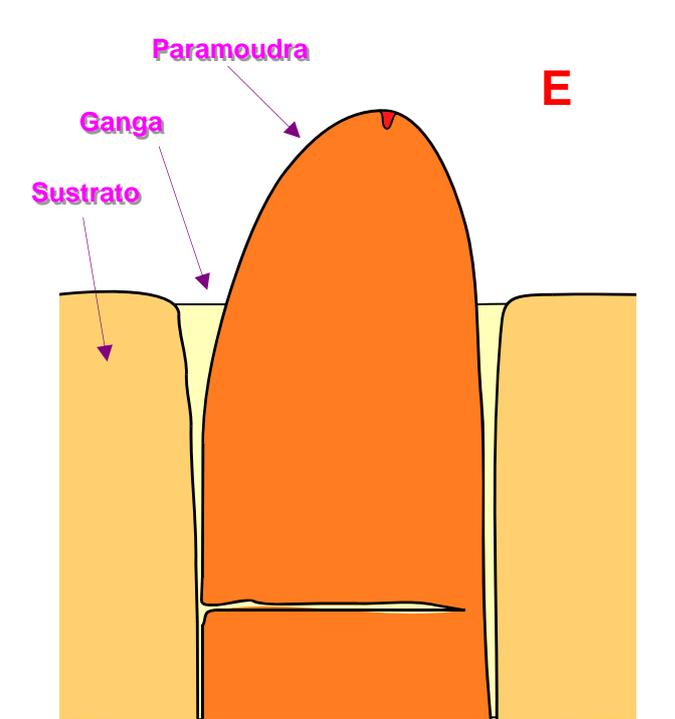
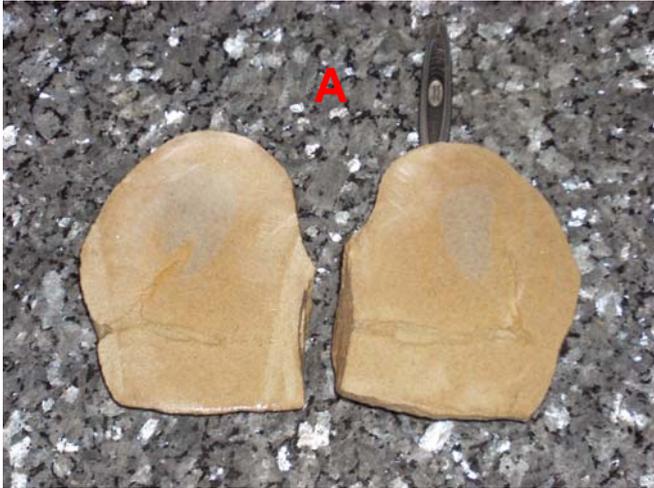
La 8 es una esfera de 22 cm de diámetro (11 kg de peso) sin orificios visibles en superficie; un corte ecuatorial muestra una imagen nacarada y un cordoncillo blanco en el centro, friable como talco, de probable magnesita. Posteriormente se efectuaron cortes paralelos (4 en total) y en estos se aprecia un agujero oval con manchas blancas, similar a la muestra 7, más algunas manchitas verdes de glauconita. La periferia de la concreción es de distinto color (color arena) y al parecer menos densa.

Las muestras 9 y 10 corresponden a grandes guijarros o cantos rodados, esféricos, desprendidos por erosión y colectados en un vallecito distante 200 m. En 9 se aprecia restos de las paredes de un cordón (negruczo) y manchitas que lo prosiguen, de posible glauconita o tal vez óxidos de manganeso. El corte de la muestra 10 posee un cordón oval, similar al anterior.

Las muestras 11 y 12 corresponden a esferas protuberantes apenas unidas al sustrato. Las secciones ecuatoriales (dos secciones en la 11) no muestran nada en su interior, pero el corte de la zona de unión al sustrato muestra en sus bases y prosiguiendo en el sustrato, cordones blancos centrados, de material friable, posiblemente magnesita.



Muestras de Paramoudras. Muestra 1: sección. Muestra 2: esfera en sección ecuatorial, vista cara inferior. Muestra 3: vista general y sección. Muestra 4: Vista general con los tramos 4a y 4b; esquema cordones al lado; el Paramoudra cilíndrico se prolonga en ambos sentidos (atravesando el magma superior -donde posee un orificio al otro lado- y, tras otro tramo visible, penetra en el sustrato inferior). Abajo: vista de 4b parte superior y sección (las secciones de 4a se muestran en otra lámina). En 1 y 4b las muestras se humedecieron (partes más oscuras) para destacar los cordones.



Muestras 4a, 5 y 6 de Paramoudras. A y B = Muestra 4a: sección longitudinal a lo largo del eje axial (nota: se pierden 3 mm de espesor en los cortes). Se aprecia el cordón axial y el inicio de las ramificaciones que conducen a los dos orificios de la rama lateral. C = Muestra 5: sección de la esfera a lo largo de ligera depresión u orificio; se distinguen dos paredes del tubo y luego una serie de inclusiones verdes de glauconita que sugieren su ramificación. D, E y F = Muestra 6. D = Vista general de la Muestra 6, en forma de obús; apenas estaba unida al fondo (fractura ampliada por erosión: ver esquema dibujado en E). F = en la continuación, tras extracción de la muestra, se aprecia la continuación del cordón en el fondo (flecha negra).



A



B



boule N°7

C



D



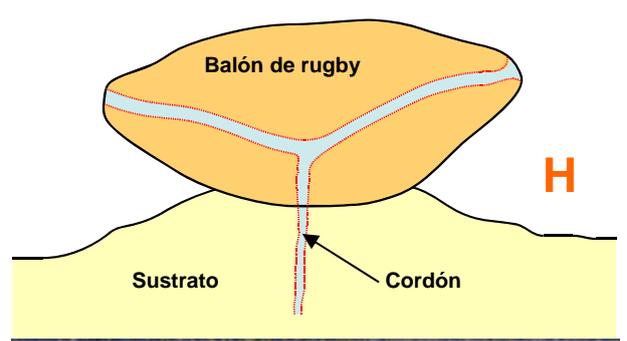
E



F



G



Balón de rugby

H

Sustrato

Cordón

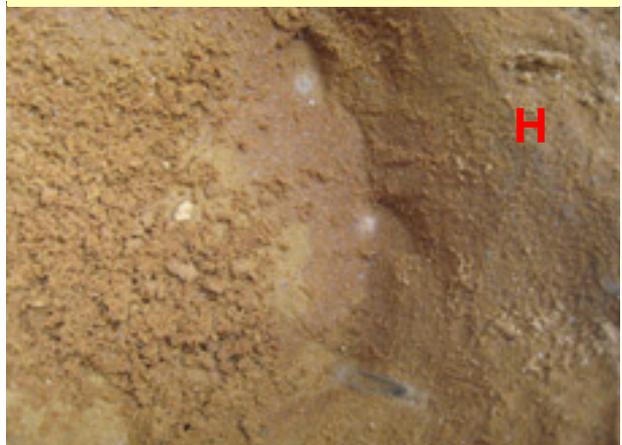
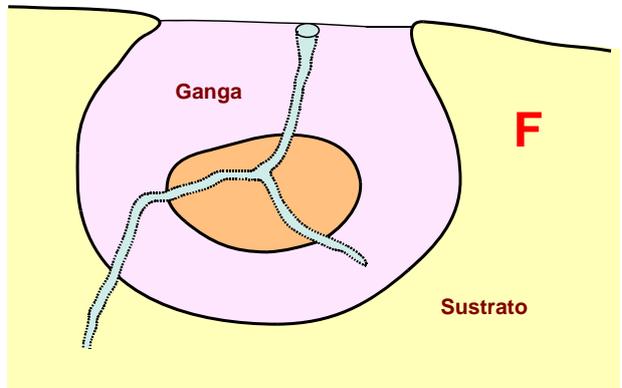
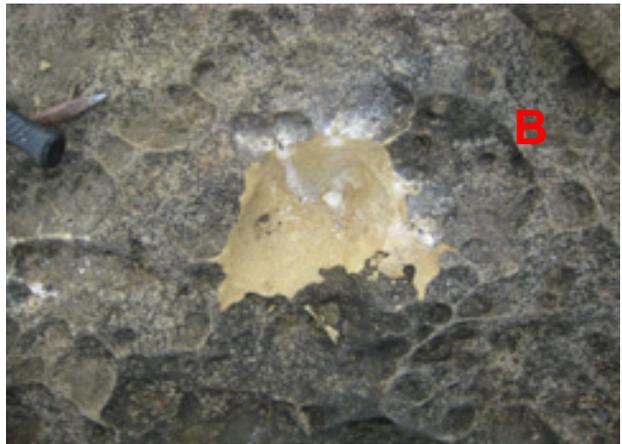


J



K

Paramoudras. Muestras 7, 8 y 13. Figuras A, B, C y D = Secciones ecuatorial y transversales de muestra 7. En C se aprecia bien la traza del tubo que rodea al cordón y en D parte del cordón e inclusión compleja, blanca y nacarada. Figuras E y F = Muestra 8, con 4 secciones transversales (E), en una de las cuales se aprecia traza del cordón. Figuras G, H, J y K = Muestra 13 ("balón de rugby"). Vista general (con los 2 orificios axiales, uno de ellos con espícula) (G), esquema (H), vista inferior con zona de unión al sustrato en la que se ve la salida del cordón (J), y entrada del cordón al sustrato (K).



Paramoudras 18 y 19. A y B = Muestra 18. En A vista general de su ubicación, muy sobresaliente del sustrato. En B se aprecia la huella en el sustrato tras el corte y la continuación del cordón. C á H = Muestra 19. Al excavar una ganga arenosa (C) apareció a la vista un tubo gris de cordón (D); prosiguiendo la excavación se alcanzó un Paramoudra ovoide (E) a través del cual proseguía el cordón (esquema en F), bifurcándose en Y invertida, con dos salidas inferiores. Tras extraer la esfera (G), se prosiguió la excavación de la ganga, que se vuelve arcillosa. Una rama fue seguida 2-3 cm. En la otra se pudo seguir hasta su penetración en el sustrato. En (H) trazas de cordón (la mancha oscura es un artefacto, la marca de un golpe de buril).

Las muestras 14, 15 y 16 corresponden a guijarros esféricos, sueltos y erosionados. En ellos, que no han sido cortados, se aprecian trazas de un único cordón en parte de la superficie externa, rebajada por erosión.

Existen además ejemplos de trazas de cordones y surcos (cordones vaciados), visibles en la superficie de cantos rodados o Paramoudras erosionados. Se excavaron superficialmente varios orificios aislados en la roca-caja, en el sustrato adyacente a Paramoudras y en dos casos se encontraron trazas de cordón con sus fundas envolventes (marrones), seguidos 3-5 cm verticalmente, donde cambian de dirección y devienen más delgados, de color blanco y consistencia de talco. Las trazas fueron seguidas picando la roca hasta 6-8 cm. Esto demuestra que el cordón puede proseguir cierta distancia pero sin generar concrecionamiento (como en la muestra 13), por tener menor contenido orgánico o por quedar alejado del punto de equilibrio redox, lo que explica a su vez los orificios aislados en el sustrato, sin formar Paramoudras.

TUBOS E INCLUSIONES

Sobre las muestras examinadas se aprecian restos de tubos o cordones, variados, a veces prolongados o acompañados por inclusiones menores. Predominan ampliamente las de colores verde oscuro en húmedo, a veces algo grises o marrones, posiblemente de glauconita, y en menor medida de colores blancos y material friable, de posible magnesita. Adicionalmente algunas trazas oscuras sugieren la presencia de manganeso y minerales de hierro.

Es de destacar que, en general, las secciones de las muestras tomadas muestran una composición interna muy homogénea, sin estructuras concéntricas. A veces el cordón central es de color sólido, en su totalidad, pero predominan los ejemplos de formas tubulares en los que el centro del tubo muestra similar aspecto y composición que la parte externa. La presencia de pequeñas inclusiones o manchitas puede ser interpretada como fragmentos de tubos, en unos casos, o como inclusiones anexas o adicionales en la proximidad del tubo o cordón axial.

Las gangas que rodean a las concreciones son en cambio de composición arcillosa, más blandas y fáciles de excavar, y colores ocres (desde marrones a amarillentas) con posible alto contenido en minerales de hierro (limonita, siderita, hematita).

La presencia de orificios en la superficie de los Paramoudras (y en cortes naturales) muestra que las partes en relieve negativo han resultado menos resistentes a la acción erosiva. Cuando no se observan espículas, es todo el cordón y su envoltura lo que es erosionado (superficialmente), mientras que en orificios con espícula la erosión ha afectado al tubo o funda envolvente del cordón, mientras que el cordón en sí puede mostrar similar resistencia (y a menudo similar composición) que la concreción que lo envuelve. Hay ejemplos en el afloramiento en que por avance de la erosión se distinguen tramos completamente perforados, al igual que orificios de gran diámetro, ampliados por erosión. Pero este resultado erosivo no es equivalente al diámetro original que pudieran tener; en este sentido, las secciones experimentales muestran que originalmente son de pequeño diámetro (5 a 8 mm). El espesor en sí de las paredes de los tubos es del orden de 0,2 a 0,5 mm.

LAS ENIGMATICAS ESPICULAS

La presencia de espículas o puntas prominentes en el centro de los orificios es muy constante en los Paramoudras de Jaizkibel. En algunas áreas más del 50% de los Paramoudras poseen espículas, que pueden sobresalir ligeramente de la concreción, pero que con más frecuencia están a igual nivel o hundidas en el interior de los orificios. En las formas más profundamente hundidas en el sustrato o en envolturas arcillosas habitualmente no se aprecian espículas.

Los cordones pueden estar también separados -en cortes naturales- de la concreción del Paramoudra, habiendo sido erosionado, obviamente, el tubo o funda envolvente.

Las espículas no son más que la prolongación o terminación superficial del cordón en la superficie, aparentemente de igual composición al resto del cordón. La hipótesis más plausible para explicar su forma más o menos cónica o aguda es que la erosión progresa redondeando el borde externo de los orificios en forma de embudo. Si el cordón es también de similar resistencia, será redondeado en su perímetro externo, con el resultado de una forma cónica o puntiaguda.

No obstante, hay algunos ejemplos en los cuales, entre la espícula y el cordón que lo prosigue, hay una estructura anular que suelda el cordón a la roca, y que a la vez une la base de la espícula al cordón que la prosigue. Preliminarmente interpretamos que la espícula en estos casos pudiera representar una parte más dura, fosilizada, tal vez de la región cefálica del organismo tubícola, o de algún opérculo que le permitiera cerrar los tubos. Aunque tal interpretación es posible, tras observar las secciones experimentales, nos inclinamos a descartar tal hipótesis, pareciéndonos más probable que pueda haber discontinuidades en la traza fósil del tubo, como lo sugiere la prolongación de secciones longitudinales de tubos en forma de manchitas alineadas dispersas. Adicionalmente, en los escasos ejemplos en que se aprecia esta estructura anular, se trata de secciones naturales expuestas a la erosión, donde ésta ha podido progresar o excavar lateralmente las partes más blandas de la funda del cordón de modo desigual. Tal vez nuevas evidencias permitan aclarar este interrogante con mayor seguridad. Pero de momento están faltando datos para llegar a conclusiones definitivas.



Cordones y espículas en Paramoudras de Jaizkibel. Nótese que la cavidad en torno a los cordones corresponde a los tubos erosionados en superficie. El rebajamiento del borde externo del orificio y de la extremidad del cordón, generan, respectivamente, una depresión en embudo y una espícula redondeada a puntiaguda.



Otros ejemplos de espículas en Paramoudras de Jaizkibel. En los superiores se aprecia parte de su desarrollo en longitud y la forma embudiforme de los orificios. Nótese en los dos de la primera fila, la estructura anular que rodea a la espícula y la une a la concreción envolvente (en la figura de la derecha fue colocado un tubo, simulando la continuación de la trayectoria del cordón hacia otro orificio, que obviamente es su continuación natural). En la fila 3 (izquierda) la espícula sobresale de la roca, es puntiaguda y dura. En esta imagen y en la inferior, surcos remanentes de cordones erosionados.

CANNONBALLS ARENIZADOS

En escarpes próximos a las zonas donde afloran Paramoudras hay también concreciones esféricas o cannonballs que no son Paramoudras. Previamente ha sido explicado que en la arenisca de Jaizkibel hay tramos y zonas con gran profusión de estas concreciones, aunque predominan ampliamente las concavidades vaciadas y no los cannonballs en sí.

Dos ejemplos de cannonballs en paredes próximas y grutas pseudokársticas, sobre roca arenizada por disolución intergranular, muestran inclusiones de lutitas o materia orgánica (en posición lateral), o cavitaciones en la parte central (que pudieran corresponder a una inclusión erosionada). La sección de esta última sugiere que podría prolongarse algo más hacia el interior de la pared de roca, aunque este extremo no ha sido confirmado.

En una nota previa sobre estructuras de corriente en las turbiditas de Jaizkibel (GALAN et al., 2008) se muestran diversos ejemplos en cuevas y abrigos pseudokársticos de cannonballs arenizados, con diversos grados de alteración e incluso con desarrollo de formas alveolares, así como también ejemplos de concreciones de hierro y anillos de Liesegang. Particularmente hay una serie de cannonballs de gran tamaño con todas las fases de desagregación. En algunos pocos casos se observan inclusiones de lutitas y orificios en el centro de las concreciones, similares a las del párrafo anterior. También hay un ejemplo de cannonballs de Igueldo con inclusiones de lutitas en la parte central.

Probablemente estas u otras impurezas actuaron como núcleo aglutinante o catalizador para iniciar el concrecionamiento esférico en los cannonballs.

En todo caso la arenización de la roca en cannonballs muestra que su cementación difiere de la de los Paramoudras, ya que mientras los primeros son arenizados con facilidad, los segundos son altamente resistentes y no muestran arenización, aunque superficialmente pueden resultar erosionados en distinto grado.

También apreciamos diferencias de densidad entre cannonballs y Paramoudras, aunque éstos por sí solos dicen poco, ya que desconocemos los porcentajes relativos de los granos de cuarzo y los respectivos cementos.

DESARROLLO ESPACIAL EN PARAMOUDRAS

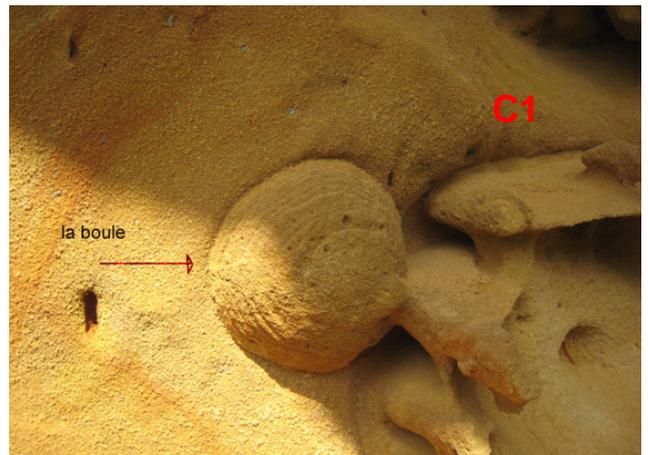
De todo lo visto destaca la complejidad en detalle que presentan los Paramoudras y la dificultad de poder seguir las trazas fósiles en la parte interna de las concreciones. A diferencia de los Paramoudras conocidos en rocas comparativamente más blandas, como la creta, donde a menudo la traza fósil es dura y queda expuesta en cortes naturales o de canteras sobre cierta extensión, en nuestro caso lo que se conserva extraordinariamente bien son las concreciones silíceas, las cuales son observables en superficie. Las trazas fósiles quedan ocultas, incluidas en roca dura, y su trayectoria puede ser interpretada a partir de los orificios externos y algunas secciones, o sobre cortos trayectos, lo que encierra mayor incertidumbre.

En las formas cilíndricas parece claro que existen cordones axiales a lo largo de su longitud, los cuales se ramifican cuando existen gemaciones o brazos laterales, o también cuando desarrollan raíces verticales que se hunden en el sustrato. En las formas esféricas puede haber un cordón central único que prosiga en vertical en el sustrato, pero también ramificaciones (en correspondencia o no con orificios externos) y diversas inclusiones. La traza de los cordones a menudo es discontinua. Y hemos visto ejemplos de esferas totalmente envueltas por una ganga arcillosa, donde los tubos o cordones prosiguen a través de ella (simples o ramificados), para alcanzar o penetrar en la roca-caja inferior. Desconocemos la complejidad que pueda existir en las formas anastomosadas y magmas mayores.

Parece evidente que el concrecionamiento no sigue en toda su amplitud vertical los tubos o cordones de los icnofósiles, sino sólo entre determinados niveles, posiblemente los comprendidos cerca de la frontera redox. También se interrumpen cuando alcanzan intercalaciones de lutitas (formas decapitadas). Los mayores desarrollos espaciales observados en Jaizkibel corresponden a formas subhorizontales (hasta 6-8 m), pero ya ha sido dicho que puede tratarse de Paramoudras conjugados o con gemaciones sucesivas y figuras coalescentes. También resulta más o menos obvio que los Paramoudras individuales pueden estar envueltos por concreciones mayores (masas irregulares y magmas), de probable formación algo más tardía.

INTERPRETACION DEL CONJUNTO DE DATOS E INTERROGANTES

Los Paramoudras son el resultado de un concrecionamiento temprano en torno a tubos o madrigueras de organismos marinos filtradores que construyeron tubos en el sedimento. La presencia de inclusiones sugiere que también pueden contener agregaciones de materia orgánica y restos de otros organismos. El nivel en que ocurren comprende 1-2 m en torno a la frontera redox, pero debido a que ésta es progresivamente desplazada, al acumularse nuevos sedimentos, puede ampliarse su desarrollo con niveles sucesivos en el mismo estrato de arenisca o en estratos alternos (separados por intercalaciones de lutitas). Los Paramoudras observados en Jaizkibel se encuentran siempre en estratos gruesos de arenisca (del orden de 3 a más de 5 m de espesor), no habiendo sido observados en estratos delgados. La proliferación de organismos (por las perforaciones y surcos observados) es mayor en la parte superior de los estratos individuales y se exagera en la proximidad del contacto con niveles delgados de lutitas.



Cannonballs arenizados, con inclusiones (serie izquierda B1-B2-B3) o cavidades internas (serie derecha C1-C2-C3). Se localizan en abrigos pseudokársticos, con roca arenizada por disolución intergranular (arriba A1-A2).

Los organismos que dan origen a Paramoudras son esencialmente tubícolas (constructores de tubos en el sedimento arenoso), y diferentes a los organismos que dejan pistas fósiles en el techo de lutitas (y contramolde en la base del estrato de arenisca suprayacente), los cuales parecen ser preferentemente reptantes o excavadores de sedimentos blandos y de hábitos alimentarios sedimentívoros. Las características y ramificaciones (verticales, horizontales y oblicuas) de los primeros no concuerdan con lo conocido sobre la biología de pogonóforos (Pogonophora o Vestimentifera) ni de nemertinos (Nemertinea o Rhynchocoela) (CENDRERO et al., 1971; GLEMAREC & GRALL, 2000; GRASSÉ et al., 1961). En cambio, es altamente probable que se trate de poliquetos tubícolas filtradores.

Los poliquetos (Annelida: Polychaeta) constituyen un grupo esencialmente marino, con más de 4.000 especies descritas, y muchos de ellos son constructores de tubos y habitantes de fondos arenosos abisales. En un medio de alta energía, con granos de cuarzo duros y angulosos, los animales blandos de cierto tamaño necesitan cierta protección en forma de conchas o tubos protectores (no se trata de infauna microscópica). Los poliquetos que viven en tubos enfeudados en el sedimento son capaces de construir tubos resistentes de muy diversa naturaleza: de caliza, quitina, pergamino, mucus y excreciones córneas, uniendo granitos (de arena, espículas de esponja, caparazones calcáreos y silíceos, restos de moluscos u otros organismos). Dichos tubos poseen variadas formas, existiendo tubos rectos, sinuosos, ramificados y en aglomeraciones correspondientes a conjuntos de individuos. La variada constitución de los materiales puede generar durante el concrecionamiento diversos minerales, a tenor de los equilibrios químicos que ocurren en ese medio a lo largo del gradiente redox. En adición, muchas especies de poliquetos son extremófilos que disponen de un penacho branquial o filamentos modificados, los cuales terminan en opérculos y tapas cónicas que les permiten cerrar los tubos cuando se repliegan a su interior. En arenicólidos, terebélidos y serpúlidos hay diversos ejemplos de especies que llenan todos estos requisitos (CENDRERO et al., 1971).

La evidencia disponible sugiere que no se trata de simples organismos excavadores, ya que al abandonar sus madrigueras o desplazarse entre el sedimento, la arena sería removida, sin dejar trazas de su paso. No obstante, es obvio que además de tubos puede haber inclusiones de materia orgánica de distinta naturaleza. Algunas inclusiones de color blanco nacarado, como las observadas en las muestras 7 y 8, podrían corresponder a fragmentos de conchas de moluscos, por ejemplo.

No obstante, en los casos de tubos simples, no es descartable que pudiera haber otros organismos además de poliquetos. Particularmente, en el caso de formas cilíndricas largas y delgadas con desarrollos subverticales es también posible que los tubos pudieran corresponder a pogonóforos. En el conjunto de Paramoudras de Jaizkibel puede haber, y lo más probable es que haya, varias especies distintas de organismos. Entre ellas predominan poliquetos, pero también pudieran estar presentes especies de otros grupos taxonómicos, en baja o muy baja proporción.

Normalmente en zonas abisales, como es el caso para la Formación Jaizkibel, la zona aerobia en el sedimento se reduce a apenas unas decenas de centímetros bajo el fondo submarino, por lo cual en nuestro caso es más probable que se cumpla la hipótesis de ZILJSTRA (1995), con las principales masas de Paramoudras formándose algo por debajo del límite oxígeno-anóxico, en zona reductora. En tal caso los tubos de los organismos actuarían como vías de paso, aportando agua oxigenada hacia el interior de la zona reductora. Incluso los organismos podrían producir corrientes para favorecer el paso de oxígeno y permitirles extender su biotopo en dicha zona.

En torno a los tubos y entre la zona aerobia y la de metanogénesis, las reacciones de descomposición de materia orgánica a lo largo del gradiente redox dependerán del receptor de electrones utilizado, es decir, seguirán el orden: $O_2 > NO_3^- > MnO_2 > FeOOH > SO_4^{2-} > CO_2$. A tenor de las concentraciones de los elementos disponibles y de la actividad bacterial pueden formarse carbonatos, nitratos, óxidos de manganeso y de hierro, sulfatos, minerales de la sílice, sulfuro de hidrógeno y metano (BRETON, 2006). Minerales como la glauconita, magnesita, siderita, hematita, limonita, óxido de manganeso y minerales silíceos pueden resultar así presentes en diversas combinaciones. En nuestro caso, en los tubos y cordones de Paramoudras son predominantes la glauconita y magnesita, pero también pueden estar presentes óxidos e hidróxidos de manganeso y hierro. En el conjunto de las concreciones de los Paramoudras los cementos predominantes parecen ser silíceos. Mientras que en las gangas o envolturas son frecuentes las arcillas arenosas ricas en hierro.

Los cementos autóctonos en arenisca son formados a partir de tres fuentes principales: la disolución y reprecipitación de cuarzo, la alteración de feldespatos, y la alteración y recristalización de arcillas detríticas y micas. Como componentes menores se incluyen carbonatos (a partir de conchas) y minerales de hierro. Las variaciones de temperatura, presión y pH con la profundidad controlan la formación de estos cementos, de los cuales el más importante es probablemente el cuarzo. La presión de solución del cuarzo conduce a su reprecipitación local como sobrecimientos (llamados syntaxiales), y suelen ser muy comunes en arenisca (SIBLEY & BLATT, 1976), con lo que se produce una pérdida de porosidad tanto por reducción del volumen de los poros como por el crecimiento del cemento (sílice autigénico). La formación de cementos silíceos y glauconita por autigénesis se producen en fases muy tempranas de la diagénesis, y puede comenzar a pocos metros de profundidad de enterramiento, poco después de su sedimentación (COCKS & PARKER, 1981).

En las gangas o envolturas externas de la concreción silícea de los Paramoudras es frecuente la limonita, de colores marrones y consistencia relativamente suave; esta es una mezcla compleja de óxidos e hidróxidos de hierro. Cuando se incrementa el contenido en manganeso adquiere colores muy oscuros a negros. Las concreciones parecen estar desprovistas de arcilla, sugiriendo que su contenido previo ha sido reemplazado por cementación. La magnesita (un carbonato de magnesio parecido a talco, presente en los cordones) puede proceder de la serie de descomposición de la siderita (carbonato de hierro), ya que este mineral forma en solución series con la rhodocrosita (carbonato de manganeso) y la magnesita. Es decir que estos

tres minerales son los miembros finales puros de unas series donde existen formas intermedias. La glauconita es un mineral microcristalino dioctaédrico que se compone a grandes rasgos de 50% de sílice, 25% de óxidos de hierro, 10% de silicatos de Al y Mg, y 15% de K y agua (PETZALL, 1967), y es el que con más frecuencia se encuentra en las paredes de los tubos de Paramoudras. La glauconita puede ser formada por varios procesos diferentes, tal como la directa precipitación o alteración de silicatos detríticos, pero principalmente se forma por alteración de materia orgánica, particularmente pellets (bolitas o heces) fecales y habitualmente requiere para su formación un ambiente ligeramente reductor (KEMPE, 1981).

La glauconita es el mineral verde predominante en la composición de los tubos de Paramoudras (BROMLEY et al., 1975); primero se pensó que representaba las paredes de los tubos en sí mismas, pero exámenes más atentos permitieron definir que comprende sus límites internos, mientras que la capa externa es de la propia roca de la concreción. La glauconita de los tubos examinados por estos autores, cuando alcanza su mayor desarrollo (en afloramientos de creta) adquiere un intenso color verde-negruzco y en algunas localidades llega a tener 5 mm de espesor, pero normalmente es milimétrico. El relleno interno de los tubos en cambio suele ser gris y probablemente de los mismos minerales que forman la concreción externa, aunque a veces adquiere tintes verdosos, lo que sugiere que puede tener cierto contenido glauconítico, difundido a partir de los tubos. El diámetro del relleno del cordón parece corresponder a la madriguera en sí de los organismos y alcanza 2-6 mm (hay casos de hasta 8 mm), y puede adelgazarse en forma de filamento de menor diámetro. La glauconitización de las ramas laterales se debilita a medida que aumenta la distancia al tubo axial. El diámetro de estas ramas raramente excede 3,8 mm y comúnmente se aplanan lateralmente por compactación o colapso.

BROMLEY et al. (1975) señalan también que en los Paramoudras por ellos examinados las terminaciones superiores convincentemente no han sido observadas, ya que es difícil esperar que las bocas de las madrigueras sobre el suelo oceánico puedan ser preservadas. Tanto porque el sedimento superficial no es suficientemente estable para su preservación, como porque habitualmente serán destruidas por bioturbación del tope superior. Los centímetros superiores de las madrigueras probablemente estén en zona oxigenada sobre la interfase redox, pero no es de esperar que la diagénesis de la glauconita pueda continuar bajo tales condiciones hasta el piso oceánico. Igualmente no han sido registradas terminaciones distales, lo que puede ser debido al debilitamiento progresivo de la mineralización tanto en las ramas laterales como en profundidad. Los desarrollos verticales más extensos reconocidos por estos autores alcanzan 4-4,5 m de espesor, limitados también a estratos individuales de creta y aunque no han sido capaces de seguir ningún tubo o madriguera hasta su terminación natural inferior, presentan un caso en que exitosamente excavaron y observaron que el tubo vertical giraba, se adelgazaba y se tornaba horizontal antes de alcanzar la base del estrato.

En la arenisca de la Formación Jaizkibel, las concreciones silíceas que constituyen los Paramoudras alcanzan desarrollos individuales horizontales de hasta 6-8 m y desarrollos verticales de hasta un máximo observable del orden de 2 m. Los tubos y cordones axiales, de pocos milímetros de diámetro, debido a la dureza de las concreciones sólo pueden ser seguidos sobre cortos trayectos y su desarrollo espacial es en gran medida inferido a partir de los orificios externos y algunos (pocos) cortes que ha resultado factible realizar en laboratorio. No obstante, el mayor interrogante lo representa la identificación taxonómica de los organismos constructores de tubos. Y es muy posible que nunca llegue a conocerse con certeza, ya que al tratarse de cuerpos orgánicos blandos no han dejado fósiles. Las trazas fósiles de los tubos o madrigueras (ichnofósiles) presentan también dificultades para su descripción, por lo incompleto de las evidencias. Aunque han sido citados 5 ó 6 ichnoespecies de Paramoudras a lo largo del texto, sólo llenan parcialmente los requisitos para ser adscritos a las mismas. Lo más que podemos de momento afirmar es que los Paramoudras de Jaizkibel e Igueldo contienen ejemplos parciales próximos o muy parecidos a las descripciones existentes de los citados ichnofósiles. Pero no hay una correspondencia total. Por lo que suponemos que en la mayoría de los casos podrán ser descritos como nuevos ichnogéneros e ichnoespecies. El desarrollo de Paramoudras en areniscas turbidíticas es muy poco frecuente y de igual modo su edad Eocena es inhabitual. Lo que nos inclina a considerarlos ichnotaxa nuevos, que probablemente puedan ser descritos por especialistas en la materia tras estudio más detallado.

La conspicua diagénesis que toma lugar en torno a los tubos o madrigueras y que da origen a los Paramoudras parece estar mediada por las condiciones anómalas creadas en el sedimento por la presencia de los organismos. Sus galerías y tubos crean unas condiciones microambientales de oxigenación, que introducen en el sedimento profundo. Pero además, su más significativa consecuencia es que la presencia de los organismos introduce cantidades considerables de materia orgánica a niveles en que normalmente sería removida por actividad bacteriana (BROMLEY et al., 1975). Las fases orgánicas serán difundidas en el sedimento como resultado de los procesos metabólicos durante la vida de los organismos así como también por la descomposición de sus cuerpos tras sus muertes. Los gradientes químicos bajo estas desiguales distribuciones de materia orgánica en ambiente anaerobio proveen así la base para explicar la diagénesis de los Paramoudras.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los datos presentados son, básicamente, de naturaleza descriptiva. Al parecer los procesos físico-químicos que intervienen en la diagénesis de los Paramoudras son actualmente bien comprendidos (BRETON, 2006; BROMLEY et al., 1975; CLAYTON, 1986; JUIGNET & BRETON, 1997; TOYTON & PARSONS, 1990; ZILJSTRA, 1995). Los minerales presentes en las concreciones y en los ichnofósiles pueden variar a tenor de las condiciones de equilibrio en cada situación concreta,



Paramoudras en Jaizkibel 1. Arriba: En ruta hacia Jaizkibel 2. Abajo: Paramoudras cilíndricos subverticales con forma de ánfora o espongiiformes. Nótese los planos de estratificación, con intercalaciones delgadas de lutitas, que han sido erosionados formando entrantes y abrigos entre los estratos escalonados de arenisca.

condicionada a su vez por las concentraciones de los elementos disponibles a lo largo del gradiente redox y de otras variables químicas y microambientales. Los aspectos biológicos son en cambio mucho peor entendidos. Particularmente la clasificación de los Paramoudras en base a sus ichnofósiles es cuando menos poco precisa.

Normalmente en la clasificación geológica de una gran variedad de concreciones y nódulos, tres son los factores tomados en cuenta: su forma, composición y agentes cementantes. En bioichnología, en cambio, la atención central es puesta en la forma y dimensiones de las trazas de los ichnofósiles. Los organismos que originan los tubos o madrigueras en realidad son desconocidos, tanto como su biología y ecología, aunque algunas hipótesis tentativas han sido propuestas. Sin embargo los Paramoudras consisten en concreciones organizadas en torno a estos tubos, cuya diagénesis es precoz, anterior a la compactación y litificación del conjunto del sedimento.

La forma y aparente composición de los Paramoudras de Jaizkibel son descritas en este trabajo. Así como también se adelanta una interpretación sobre los probables organismos que originaron los tubos. Sin embargo, la evidencia reunida sobre las trazas fósiles y sus desarrollos espaciales es comparativamente muy incompleta. No obstante se presentan ejemplos ilustrativos muy curiosos sobre la complejidad de estas trazas fósiles. Entre ellos, serán discutidos los siguientes:

(1) Los Paramoudras pueden incluir tubos y cordones (los ichnofósiles en sí) más una serie de inclusiones que no resulta claro como están relacionadas con los tubos. Nuestra hipótesis al respecto es que pueden coexistir junto a los tubos de poliquetos, fragmentos orgánicos de otras especies de la infauna de la arena, y muy probablemente también grumos o agregaciones de materia orgánica, externa a los tubos (pellets y restos orgánicos producto de su metabolismo, procedentes de detritos oceánicos o procedentes de organismos del bentos de horizontes arcillo-limosos suprayacentes).

(2) Los tubos de Paramoudras pueden ser simples o presentar diversas bifurcaciones. El hallazgo de bifurcaciones en "Y o en T invertidas" no había sido citado anteriormente, como tampoco la extraordinaria cantidad de trazas en Paramoudras estrellados y multiperforados. En tales casos es difícil imaginar que sean madrigueras simultáneas de un único organismo. Más bien nos inclinamos a hipotetizar que pueden ser construcciones sucesivas (con ramas abandonadas) del mismo organismo o ramas múltiples de colonias de organismos, seguramente adosados aunque no conectados internamente. Esto último es frecuente en poliquetos vivientes, tal como serpúlidos y terebélidos. También hay ejemplos de poliquetos tubícolas coloniales, como las hermelas y sabelarias, que trabajan la arena (aglutinando los granos con un órgano especial) para formar tubos y dar origen a construcciones coloniales en masas voluminosas, resistentes, con el aspecto de grandes panales o de corales. Aunque este último caso no se asemeja a los tubos de Paramoudras, sirve de modo comparado para indicar la capacidad de muy diversas especies de poliquetos vivientes para originar tubos complejos en muy distintos sustratos.

Nuestro conocimiento y revisiones bibliográficas sobre invertebrados marinos nos inclinan a postular la hipótesis de que los poliquetos de la familia de los serpúlidos son los más probables organismos para generar las formas presentes en los Paramoudras de Jaizkibel. La diversidad de tubos que son capaces de construir los poliquetos de esta familia es enorme. Además es frecuente en ellos la capacidad de modificar radios o filamentos de sus penachos branquiales para formar opérculos que pueden cerrar la abertura de los tubos cuando los animales se refugian en la parte profunda de sus guaridas. Para ello el extremo del filamento puede tomar la apariencia de un embudo, de una esfera, de un cono y muchas otras por demás caprichosas. El opérculo garantiza la integridad y el sosiego del gusano mientras está en su refugio, aspecto conexo con una estrategia anti-predación pero también útil para la supervivencia entre sedimentos sujetos a descargas periódicas de turbiditas. A la vez, la presencia de opérculos podría relacionarse con las extrañas estructuras halladas en algunas espículas de orificios de Paramoudras, aspecto sobre el cual aún no disponemos de conclusiones definitivas.

Otro aspecto relacionado con las ramificaciones es que en los poliquetos, a diferencia de los otros grupos citados, además de reproducción sexual son muy comunes diversos tipos de reproducción asexual que generan individuos (y colonias) ramificados (procesos de gemmiparidad, escisoparidad y esquizogamia). Por gemmiparidad se generan gemaciones, yemas o brotes laterales, en un punto de la cara ventral del organismo; a partir de él se diferencian otros individuos y las células genitales emigran a ellos, interviniendo en el proceso las tres capas embrionarias. En la escisoparidad (también frecuente en oligoquetos) se produce una disociación metamérica, donde cada segmento o metámero da forma a un individuo completo. En la esquizogamia se producen procesos de estolonización, donde los gonocitos sólo se encuentran en un cierto número de segmentos posteriores que forman el estolón; los segmentos anteriores desprovistos de productos genitales constituyen las cepas o estóolidos (= souches). En la madurez el estolón se desprende para formar a partir de una misma cepa una cadena de individuos estoloníferos, que pueden ser morfológicamente distintos para cada sexo (Ver p.ej. GRASSE et al., 1961).

En general, el hallazgo de bifurcaciones y ramificaciones, frecuentes en los Paramoudras de Jaizkibel e Igueldo, nos lleva a descartar a pogonóforos y nemertinos como potenciales candidatos para generar Paramoudras, ya que no hay evidencia entre los representantes vivientes de estos grupos zoológicos de especies que construyan tubos ramificados. No obstante, no se descarta que en el caso de tubos simples, particularmente de poco diámetro, puedan estar representadas especies de otros grupos, tal como pogonóforos o braquiópodos. En este último grupo hay ejemplos en la clase Ecardines de formas tubícolas con valvas elongadas (las cuales encierran el aparato branquial), seguidas de un largo pedúnculo contráctil, el cual les permite aflorar en la superficie de la arena o hundirse en sus tubos; las valvas córneas segregadas por el manto están compuestas de quitina y fosfato de calcio, y pueden tener en su base estructuras en anillo o en collar, para adherirse al sustrato.

(3) Las anastomosis de Paramoudras, de similar o distinto tipo, son muy frecuentes en Jaizkibel y conducen a pensar en colonias de organismos. Aún tratándose de distintas especies, puede suponerse que puede haber coalescencia o contigüidad

de tubos entre varios individuos, o que pueden existir tubos adosados o soldados externamente, sin implicar conexiones internas. Inversamente, puede pensarse en otras hipótesis en las que las ramas laterales pueden ser producciones de un mismo individuo para diversos fines, por ejemplo galerías y cámaras incubadoras o para depósitos de huevos o resguardo de formas larvianas y juveniles. Algunos autores han sugerido la construcción de cámaras para almacenamiento de heces y desechos, pero esto parece poco verosímil. Como señalan BROMLEY et al. (1975), las ramas laterales han contenido mucha menos materia orgánica que los tubos axiales y además ésta se reduce progresivamente, mientras que si hubieran tenido tal función (o alguna otra función sanitaria) habrían resultado bien mineralizadas, lo cual no es el caso. La falta de mineralización distal y la ubiqüista presencia de las ramificaciones laterales hace que estos autores también descarten la presencia de otros animales viviendo comensalmente con el animal del tubo. Esto último, en cambio, a nosotros no nos parece descartable, ya que particularmente en poliquetos y equiuroides no es infrecuente la presencia de muy diversos comensales (otros anélidos, crustáceos, e incluso pequeños peces tal como góbidos).

Aunque la naturaleza funcional de las ramificaciones laterales permanece inexplicada, creemos que puede pensarse en dos tipos de explicaciones. Ya que las ramificaciones pueden formarse a diversas alturas en el sustrato, no es descartable que se trate de gemaciones o estolones, o -simplemente- de galerías activas sucesivas, las cuales van siendo construidas y abandonadas a medida que progresa el aporte de sedimentos y se desplaza hacia arriba la frontera redox. Otro tipo de interpretaciones es que se trata de conducciones para facilitar la circulación de agua y oxigenar la zona anóxica, o bien para facilitar en sentido inverso el paso rápido de indeseables emisiones de sulfuros procedentes de zonas más profundas.

En caso de haber existido emisiones de sulfuros, no es descartable la presencia de poganóforos, ya que este grupo contiene especies (p.ej. *Alvinella pompejana*) capaces de utilizar la producción primaria de bacterias quimioautótrofas, como ocurre en torno a hot vents y chimeneas negras, aunque los animales son aerobios, provistos de branquias, que utilizan el oxígeno del agua de mar (CHEVALDONNE, 1997). Pero este grupo, como ha sido dicho, no genera formas ramificadas.

Adicionalmente ha sido señalada la co-ocurrencia de bioturbaciones junto a Paramoudras en creta, con presencia de organismos que habitualmente dejan pistas fósiles en las capas arcillosas, tales como los ichnogéneros *Thalassinoides*, *Chondrites*, *Zoophycos* y *Planolites*. Estas huellas son simplemente el trabajo de organismos sedimentívoros (comedores de sedimento) y la glauconita muy raramente está asociada a sus trazas (sólo con *Thalassinoides* y muy local y débilmente). Tales organismos pueden introducir materia orgánica hasta cierta profundidad, enriqueciendo de este modo la parte superior del biotopo en que se encuentran los tubos de Paramoudras, aspecto que podría estar relacionado con la formación de masas de concreciones irregulares cercanas a los lechos con Paramoudras, aunque no con los Paramoudras en sí. En todos los casos observados los tubos de Paramoudras atraviesan las trazas de este tipo de ichnofósiles y claramente las post-datan (BROMLEY et al., 1975). Esto enfatiza ulteriormente que los tubos de Paramoudras descienden a mucha mayor profundidad bajo el suelo oceánico que las madrigueras excavadas por los organismos sedimentívoros habitantes de las arcillas y limos (aunque eventualmente éstos puedan hundirse en la arena subyacente). Los organismos que generan los Paramoudras son por el contrario micrófagos filtradores. (Ha sido sugerido que algunos Paramoudras filiformes en creta pudieran incluir a especies predatoras de vida libre, pero sin evidencia para respaldar este extremo, poco probable).

(4) Las concreciones totalmente separadas del sustrato por envolturas margo-arcillosas. Constituyen un hecho curioso los ejemplos hallados de Paramoudras esféricos totalmente incluidos en el sustrato y rodeados de gangas margo-arcillosas, de espesor a veces considerable. No obstante, parecen predominar ampliamente geoformas que presentan algún brazo o puente de unión entre la concreción y el sustrato. Obviamente tales rasgos resultan enmascarados por la existencia de películas superficiales de meteorización con cianobacterias que otorgan una uniforme y monótona coloración gris a las areniscas. La presencia de envolturas puede ser explicada por diagénesis concéntrica, tal como ocurre con frecuencia en cannonballs y sandstone logs (formas cilíndricas horizontales que recuerdan a troncos) (GROENEWOLD, 1971; JACOB, 1973). En torno a los tubos de Paramoudras, se produce una intersección de los gradientes redox vertical y horizontal, con un resultado envolvente. Es frecuente en cannonballs y Paramoudras la formación de gradientes centrífugos, en los cuales el cemento precipita en la concreción desproveyendo a su periferia de unos elementos y permitiendo la concentración de otros en la ganga que los rodea. La ausencia de arcillas en las concreciones de los Paramoudras, unidas por cementos silíceos, desprovee su periferia de los minerales cementantes y propicia en cambio el enriquecimiento en capas concéntricas de materiales arcillo-ferruginosos.

(5) La distribución de los Paramoudras en la región. Nuestras observaciones sugieren que predominan unos tipos de Paramoudras sobre otros en los distintos estratos de arenisca. Su distinta localización espacial en los afloramientos es en parte debida a la desigual erosión y recorte de los diferentes estratos por el modelado de superficie, con el resultado de que cada estrato individual con Paramoudras aflora en un área anexa distinta, siguiendo su escalonamiento.

No obstante, a nivel general, la presencia de Paramoudras y de una gran cantidad de cannonballs en las areniscas de la Formación Jaizkibel, puede verse facilitada por la ocurrencia de fenómenos de convección hidrotermal, bajo el relleno de turbitas, con emisiones hidrotermales de sulfuro de hidrógeno. Tal actividad es relativamente frecuente en áreas con alto flujo de calor, usualmente en los flancos de dorsales en expansión, pero también en zonas de rifting y zonas tectónicamente activas (KEMPE, 1981). En torno a hot vents es frecuente la proliferación de bacterias capaces de utilizar directa o indirectamente las emisiones de sulfuros y de raros organismos, como los que pueden estar en el origen de los Paramoudras. En zonas más alejadas de las fuentes de calor y emisiones de H₂S, cualquier resto orgánico o partícula mineral distinta puede también servir de núcleo catalizador de las reacciones que producen cannonballs.

Esta hipótesis resulta atractiva porque también encaja con la complejidad tectónica que presenta la cuenca Eocénica del País Vasco. La región de estudio está situada en una zona compleja y poco investigada, entre la cordillera de subducción del margen noribérico y la cadena de colisión de los Pirineos. La zona de rifting en que se produjo la apertura del Golfo de Vizcaya es luego seguida de fases compresivas, durante la orogénesis pirenaica, que dejan abierto un amplio margen para la ocurrencia de fenómenos geotérmicos e hidrotermales bajo el relleno de turbiditas Eocenas.

Nuestra principal conclusión es que el hallazgo de Paramoudras en el pseudokarst en arenisca de Jaizkibel abre un amplio campo de estudio, sobre la diversidad de formas de las concreciones, los ichnofósiles que contienen, y las condiciones bajo las cuales se formaron. La existencia de ejemplos por demás notables de geofomas debidas a Paramoudras y de indescritos ichnotaxa en proceso de estudio, confirman el gran interés científico que revisten estos hallazgos, cuya investigación se puede decir que está en una fase inicial.

REFERENCIAS ADICIONALES

Información complementaria sobre el pseudokarst en arenisca y los Paramoudras de Jaizkibel (con otros ejemplos y fotografías) pueden ser consultados en las páginas web: aranzadi-sciences.org (Departamento de Espeleología, apartado Artículos de consulta) y cota0.com (trabajos en PDF). Ver en especial sobre Paramoudras: GALAN & MOLIA (2008).

AGRADECIMIENTOS

A Luis Viera, por sus útiles comentarios y aportes bibliográficos. De modo especial a Marider Balerdi e Iñigo Herraiz por su continuada ayuda en las exploraciones del pseudokarst de Jaizkibel y trabajos de campo. A todos los colaboradores que en distintas ocasiones nos acompañaron en las prospecciones de los litorales de Jaizkibel, Ulía e Igueldo, entre ellos a: Daniel Arrieta, Hugo Pérez Leunda, Carlos Oyarzabal, Malkoa Zarandona, Olatz Zubizarreta, Izaskun Katarain, y Pablo Roldan Intxusta.

BIBLIOGRAFIA

- BERGER, W. H. 1974. Deep-sea sedimentation. In: Burk, C. A. & C. L. Drake (Eds.): The geology of continental margins. Berlin: Springer-Verlag. Pp: 213-241.
- BRETON, G. 2006. Paramoudras et autres concrétions autour d'un terrier. Bull. Inf. Géol. Bass. Parris, 43 (3): 18-43.
- BROMLEY, R.G.; SCHULZ, M. & N. B. PEAKE. 1975. Paramoudras: giant flints, long burrows and the early diagenesis of chalks. Mus. Min. et Geol. Univ. Copenhagen, Comm. Paleontol., 224: 1-31 + 5 plates.
- CAMPOS, J. 1979. Estudio geológico del Pirineo vasco al W del río Bidasoa. Munibe, S.C.Aranzadi, 31(1-2): 3-139.
- CENDRERO, O; BÜCHERL, W.; RIOJA, E. & G. N. WOLCOTT. 1971. Zoología Hispanoamericana: Invertebrados. Ed. Porrúa, México, 1151 pp.
- CHEVALDONNE, P. 1997. The fauna of deep-sea hydrothermal vents: an introduction. In: Desbruyères, D. & M. Segonzac (Eds.). Handbook of deep-sea hydrothermal vent fauna. Interridge/IFREMER, Brest, pp: 7-20.
- CLAYTON, C.J. 1986. The chemical environment of flint formation in Upper Cretaceous chalks. In: Sieveking, G. & M. Hart (Ed.). The scientific study of Flint and Chert. Cambridge Univ. Press., pp: 43-54.
- COCKS, L. R. M. & A. PARKER. 1981. The evolution of sedimentary environments. In: Cocks, L.R.M. The Evolving Earth. British Museum (Natural History), Cambridge Univ. Press, II (4): 47-62.
- FELDER, W.M. 1971. Een bijzondere vuursteenknol. Grondboor en Hamer, 2: 30-37.
- GALAN, 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.
- GALAN, 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.
- GLEMAREC, M. & J. GRALL. 2000. Les groupes écologiques et zoologiques d'invertébrés marins face aux dégradations de l'environnement côtier. Bull. Soc. Zool. Fr., 125 (1): 37-48.
- GRASSÉ, P. P.; POISSON, R. A.. & O. TUZET. 1961. Zoologie I: Invertébrés. Précis de Sciences Biologiques sous la direction du P.P. Grassé. Masson et Cie Editeurs, Paris VI, 920 pp.
- GROENEWOLD, G. 1971. Concretions and nodules in the Hell Creek Formation, south-western North Dakota: Unpublish M.S. Thesis, UND, 84 p.
- JACOB, A. F. 1973. Elongate Concretions as Paleochannel Indicators, Tongue River Formation (Paleocene), North Dakota. Geological Society of America Bulletin, v.84, p. 2127-2132.
- JUIGNET, P. & G. BRETON. 1994. Stigigraphie, rythmes sédimentaires et eustatisme dans les craies turoniennes de la région de Fécamp (Seine-Maritime, France). Bull. Soc. Géol. Normandie et Amis Muséum du Havre. 81(2) : 55-81.
- JUIGNET, P. & G. BRETON. 1997. Brèches de silex, diagenèse et déformation dans les craies de Haute-Normandie (France). Ann. Soc. Géol. Nord, 5, 2e sér., pp: 227-240.
- 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.
- PETZALL, W. 1967. Sedimentación marina. In: Ecología Marina. Margalef et al. Edit., Fundación La Salle de Ciencias Naturales, Caracas, Cap. 2: 35-66.
- SIBLEY, D. & H. BLATT. 1976. Intergranular pressure solution and cementation of the Tuscarora orthoquartzite. Journal of Sedimentary Petrology, 46: 881-896.
- TOYTON, R. & D. W. PARSONS. 1990. The compactation history of a composite flint and his host sediment. Proc. Geol. Ass., 101 (4): 315-333.
- ZILJSTRA, H. 1995. The Sedimentology of chalk. Lectures notes in Earth Sciences, 54, Spinger Verlag, Berlin, New York, 194 p.