

ALTERACIÓN Y MODELADO DE LAS ARENISCAS DE LA FACIES PURBECK-WEALD DEL NOROESTE DE LA CORDILLERA IBÉRICA

E. SANZ PÉREZ

Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Ciudad Universitaria. 28040 - Madrid.

Resumen: Se describen las tipologías de los modelados que caracterizan las cuestras en arenisca de la facies "Purbeck-Weald" del Norte de la Cordillera Ibérica. El frente de las cuestras está afectado por tafonis y cavidades y el dorso por gnammas, pasillos y grietas poligonales. Se hacen diversas consideraciones sobre los procesos genéticos que las pueden originar.

Palabras clave: Grietas poligonales. Cavidades. Tafonis. Gnammas. Weald. Cordillera Ibérica.

Abstract: In this article, the different types of the weathering landform which characterize the sandstone cuestras in the "Purbeck - Weald" of the Northern Iberian Ranges are described. The face of the cuestras is affected by tafonis and basal undercutting and their back by gnammas, drainage channels and polygonal cracking. Several considerations are taken into account about the genetic processes of these landforms.

Key Word: Polygonal Cracking. Basal undercutting. Tafonis. Gnammas. Weald. Iberian Ranges.

1. Introducción

En los relieves en cuesta de las areniscas de la facies "Purbeck-Weald" que se extienden a lo largo del Valle de Lara en la Altiplano Soriana, se ha desarrollado un meso y micromodelado por meteorización muy peculiar. Sobre la superficie desnuda del reverso de las cuestras se localizan numerosas depresiones cerradas de pequeño tamaño ("gnammas") y grietas poligonales ("polygonal cracking"), mientras que el frente se halla afectado por procesos de tafonización y cavidades en la base.

Aunque este modelado se halla repartido de manera generalizada en aquella Formación geológica, en las inmediaciones de la capital soriana, en la Dehesa y Monte de Valonsadero, se pueden reconocer la mayor parte de las formas más representativas descritas en este trabajo. En el presente estudio se ha hecho una revisión de nuestra anterior publicación (Sanz, 1994), distinguiendo las diferentes condiciones genéticas de formas en ocasiones similares, en particular de los tafonis y cavidades que en nuestra área de estudio aparecen casi siempre juntas.

2. El área de estudio

El ámbito de este estudio abarca el sector donde afloran estas areniscas del "Weald" dentro de la provincia de Soria. Se localiza al norte de la Cordillera Ibérica y, dentro de la Altiplano Soriana, en la depresión que se extiende de Este a Oeste entre los grandes macizos Distércicos de Urbión, Cebollera y Neila al Norte, y el Cordón Calizo de Soria (Sierra de Cabrejas) al Sur. La zona, con una altitud variable entre 1.000 y 1.300 m incluye en la provincia de Soria la región de Pinares y campiña de Cidones, dentro de la cual se encuentra Valonsadero. Comprende un rectángulo de unos 60 a 70 km de longitud, por 20-30 km de anchura, que coincide con el denominado "Valle de Lara" de Sáenz (1951), que es por donde discurren, en sentido opuesto los ríos Arlanza, hacia el Oeste, y el río Duero, hacia el Este.

En esta zona se han reconocido numerosos afloramientos, entre los que podemos destacar: Valonsadero (Térm. Mun. Soria), alrededores de Pedrajas, Oteruelos, Cidones, Golmayo, Carbonera, Covalada, Herreros, orillas del Pantano de la Cuerda del Pozo, etc. (Fig. 1)

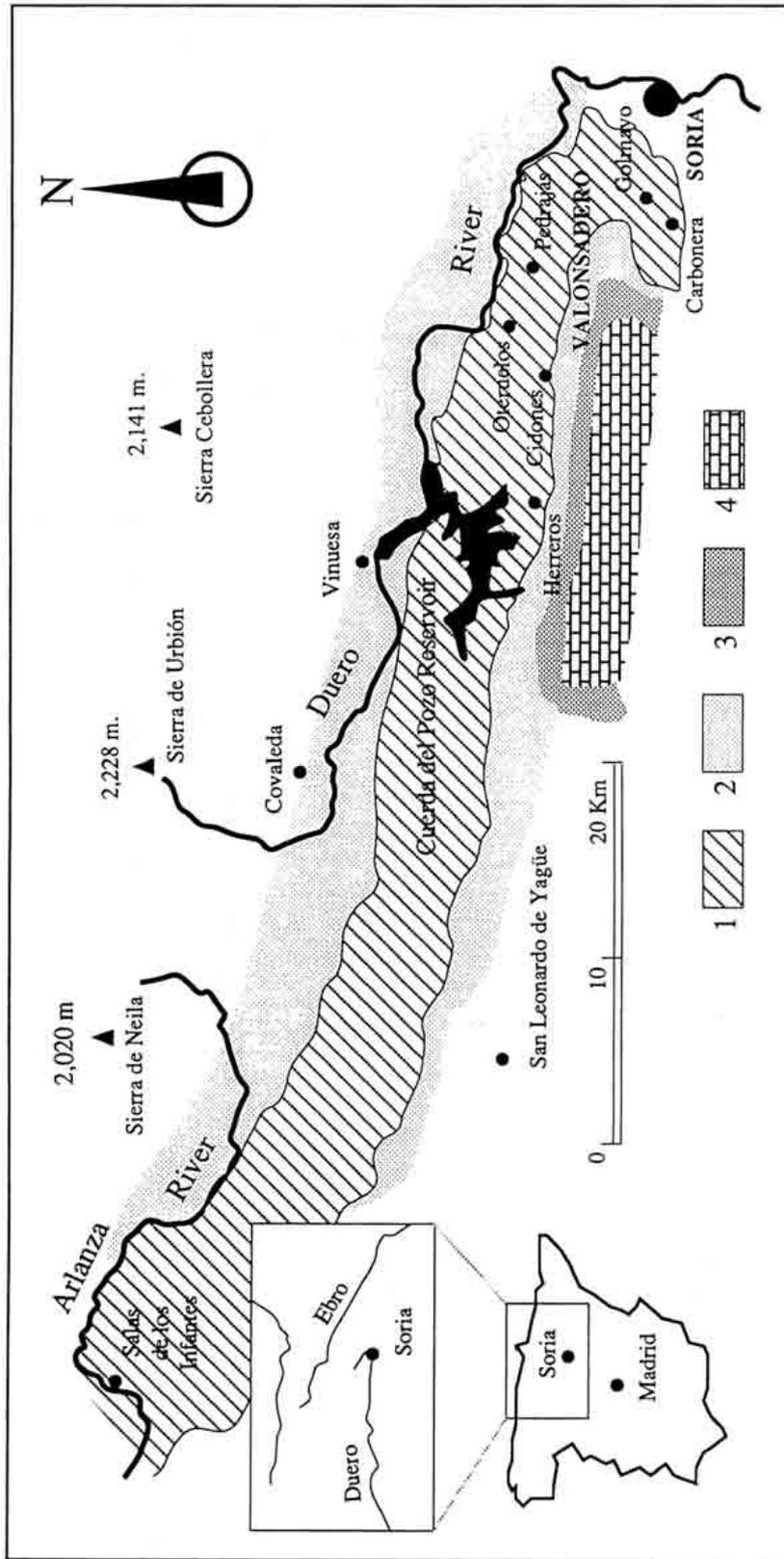
En cuanto a la climatología se refiere, ésta presenta unas características mediterráneas relativamente húmedas y frías. La precipitación media anual es de unos 750 mm, aunque varía entre la isoyeta 550 mm que se halla cercana a Soria y la de 1.000 mm de Vinuesa, por lo que se observa un aumento de SE a NO de más de 400 mm en una distancia de 30 km. El 74% de las precipitaciones se efectúan en los meses de temperatura baja, habiendo dos máximos que corresponden al otoño y a la primavera; esto evita que la evaporación sea mayor. En Soria, la humedad relativa oscila entre el 78% y el 53%, siendo la media del 60%. La temperatura media anual es de 10° C. En la estación de Soria los procesos de hielo-deshielo son muy importantes, ya que el número medio anual de heladas es de 98 días. Todo ello da idea de la variabilidad de la temperatura durante el día y a lo largo del año. Los días de rocío son 44 y los de escarcha 41.

Los materiales pertenecen a la facies "Purbeck-Weald", que aquí están representados, de muro a techo, por los grupos Tera, Oncala y Urbión (Beuther et al., 1965), aunque es el grupo Oncala el que se hace más ostensible. El grupo Tera es de naturaleza eminentemente detrítica, y el grupo Urbión está formado por alternancias pelítico samíticas, con un conjunto detrítico grosero en la base formado por conglomerados que definen el relieve de las eminencias de los Montes Distércicos. El grupo Oncala está constituido por facies detríticas, entre las que destacan las alternancias de bancos de arenisca con limos y arcillas de color rojo y verdoso. (Palacios y Sánchez Lozano, 1885; Sáenz, 1933).

Estas capas de arenisca del grupo Oncala suelen tener un espesor entre 2 y 10 m y un desarrollo longitudinal variable desde varias decenas de metros hasta algunos centenares de metros, pues presentan una geometría lenticular suave, pasando lateralmente a limos arenosos, limos y arcillas. En ocasiones aparecen pasadas de cantos de cuarzo. En superficie, la arenisca presenta un color amarillento, ocre o rojizo. Es de aspecto homogéneo, aunque hay zonas más blandas; se hace patente la estratificación cruzada de tipo planar y de surco (IGME 1988, 1991). Esporádicamente se observan estructuras diagenéticas, como los anillos de Willson. Son rocas de relativa poca consistencia, muy fáciles de labrar, utilizadas como piedra de sillería en la mayor parte de las iglesias y casas de la zona y de Soria capital.

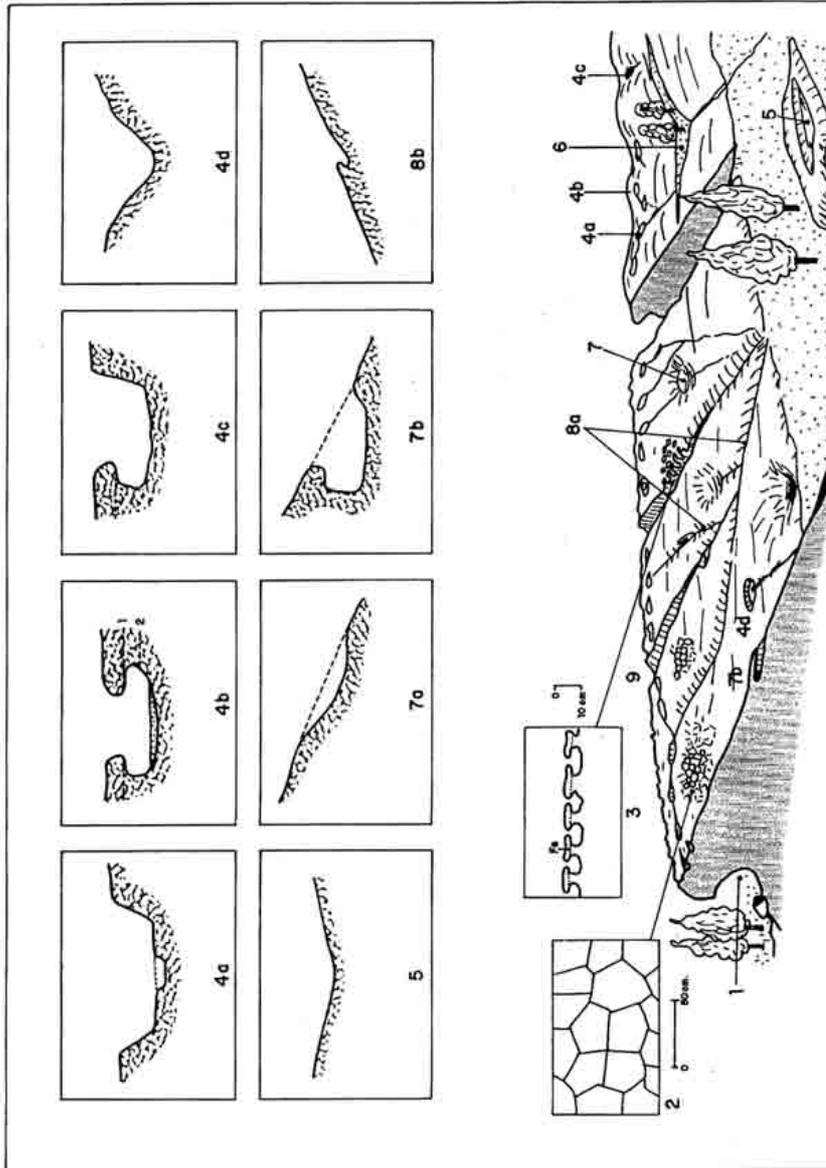
Las características petrográficas y mineralógicas de la roca están descritas en Fort y Bustillo (1990) los cuales han utilizado láminas delgadas y análisis de difracción de Rayos X. Así, las areniscas de Valonsadero pueden ser clasificadas como subarcosas y arcosas, estando constituidas por cuarzo (60-80%), feldespatos potásicos (10-30%) y mica (2-5%). Suelen ser de grano medio, subangulosos y con una selección de tamaños buena. La matriz es de naturaleza arcillosa y no supera el 5%. Esta matriz está constituida básicamente por illitas y en menor medida por caolinitas. Es de origen diagenético y procede de la descomposición de los cantos blandos de arcilla y de la transformación de los feldespatos potásicos, moscovitas e illitas. El grado de alteración de estos minerales es variable según los afloramientos.

La roca presenta una cementación de tipo ferruginoso que engloba a los clastos y a la matriz y parcialmente a la porosidad. El cemento procede de la alteración de biotitas, hematites y otros minerales opacos. El volumen de cemento en la roca es muy variable pero en general es bastante importante (5-10%), observándose un aumento hacia la superficie de la roca y en las juntas de estratificación. La porosidad de la roca, de tipo intergranular, no supera el 20%. La abundancia de manantiales ferruginosos en la zona está íntimamente relacionado con la presencia de este cemento. (G. Yélamos y Sanz, 1994)



1. Facies "Purbeck-Weald". Grupo Oncala (Sandstones of Valonsadero). 2. Facies "Purbeck Weald". Grupo Tera (Sandstones). 3. Facies Utrillas. 4. Marnes and limestones (Cretaceous).

Figura 1. Localización del área de estudio y mapa geológico de la zona de Soria.
Location of the study area and geological map of Soria.



Esquema-resumen de los distintos tipos de microrelieves en las areniscas de Valonsadero (Soria).

1. Abrigos y Tafonis 2. Grietas poligonales 3. "Setas poligonales" 4a. "Pans" con o sin otras pequeñas gnammas en el fondo 4b. "Pans" con voladizo, con o sin relleno de arena. 1, 2 diferentes alturas del canal de desagüe 4c. "gnamma" disimétrica 4d. Gnamma mixta entre "pans" y de bordes tendidos
5. Gnamma de bordes tendidos 6. Gnammas alargadas de grandes dimensiones 7a. "Armchair" o gnamma en vertiente 7b. "Armchair" disimétrica 8a. Canales 8b. Canal con voladizo 9. Pasillos.

Figura 2. Croquis resumen de las características de la alteración en las cuevas de arenisca de la Facies "Purbeck-Weald" del Norte de la Cordillera Ibérica. *Sketch-summary of the different types of microreliefs in Valonsadero sandstone slopes of the "Purber-Weald" facies in the Northern Iberian Ranges.*

La tectónica se resuelve en estructuras sencillas, con pliegues de amplio radio y series monoclinales de buzamiento suave (IGME 1988, 1991). Predominan, como se ha dicho, relieves en cuesta donde el dorso coincide con el plano de estratificación superior, dando lugar a una plataforma estructural inclinada entre 15° y 30°, y orientada de manera casi invariable en la dirección Este-Oeste. Las areniscas presentan un grado de fracturación medio, donde destacan algunas diaclasas importantes, siendo frecuente que el frente de las cuestas esté definido por planos de diaclasas verticales.

3. Descripción y distribución de formas

3.1. Abrigos - cavidades ("basal undercutting").

La meteorización en la arenisca ha producido un retroceso progresivo del frente de la cuesta, profundizando más en su parte inferior, y dando lugar a una morfología en abrigos, entre 0'5 y 6 m de altura ("basal undercutting" de Robinson y Williams, 1994). Este modelado se ha desarrollado en aquellos lugares donde la potencia de la arenisca es de varios metros.

Se observa en muchos de ellos una costra ferruginosa que va desprendiéndose hasta que aflora la roca fresca. Aunque no se ha efectuado un estudio pormenorizado de este modelado, es de observar que tiene una tipología uniforme, con grandes abrigos alargados según la estratificación. Las paredes están tan intensamente tafonizadas que resulta difícil distinguir cuando se trata de cavidades o de tafonis. Aunque son formas similares y que aquí aparecen casi siempre juntas su origen y formación es diferente.

3.2. Tafonis

En las partes bajas de los acantilados del frente de las cuestas y en los abrigos aparecen tafonis que están asociados a puntos texturalmente más débiles, como juntas de estratificación o estratificaciones cruzadas. En sus paredes pueden aparecer alveolos más pequeños de reciente creación. En otros sitios aparecen formas menores asimilables a los "honeycombing" de Robinson y Williams (1994).

3.3. Grietas poligonales ("polygonal craking", "polygonal tessellation")

Ocupando gran parte de la superficie del reverso de las cuestas, hay una capa de alteración superficial patente que tiene un espesor que normalmente no suele sobrepasar los 4 cm (surface crusting). Esta capa presenta dos niveles más o menos definidos: uno superior, constituido por una costra ferruginosa de 2-3 cm de espesor, paralela a la superficie topográfica, y otra inferior, menos competente, formada por un nivel arenoso de gran porosidad (30%), que cuando aflora sin la costra puede estar colonizado por musgos y líquenes. El nivel alto puede tratarse simplemente de un enriquecimiento de hierro de hasta el 15%-20%. El resto de la superficie de la cuesta se halla menos alterada ya que la acción erosiva actual ha destruido en parte esta capa costrificada, o se halla ocupada por gnammas.

La costra ferruginosa adquiere un desarrollo significativo en pendientes mayores, siendo frecuente la aparición de grietas poligonales bien desarrolladas o esbozos incipientes. Las formas mejor conservadas tienen un perfil plano o suavemente convexo hacia arriba, con diámetros variables entre 10 y 50 cm. Los bordes suelen estar más colonizados de musgos que en el resto de la roca, ya aquí se concentra la humedad, y estos musgos, a su vez, contribuyen activamente a la arenización lineal de la roca. Hay así casos evolucionados que por la acción incisiva y vertical de las aguas de escorrentía y de la acción vegetal, forman unos microrelieves en setas, con pasillos o corredores de drenaje profundos (entre 4 y 35 cm) y estrechos, donde las paredes tienen voladizos. (Fig. 2)

3.4. Las gnammas.

Siguiendo en parte la clasificación de Twidale y Corbin (1963), que no es posible aplicar aquí de forma taxativa pues existen formas no contempladas por estos autores, hemos reconocido los siguientes tipos de gnammas diferentes (Figura 2).

- *Gnammas semejantes a los "pans" de Twidale y Corbin (1963)*, de bordes abruptos, poco profundos, muchas veces con voladizos y de fondo plano (Fig. 3). Algunas tienen en este fondo un manto de arenas procedente de la disgregación de las paredes y suelo, evidenciando así su funcionalidad. Los voladizos pueden aparecer en un lado o en todo el borde. En planta tienen una forma elipsoidal y a veces circular. El diámetro varía entre pocos centímetros y 2 m, con profundidades entre 1 cm y 70 cm.

Su localización está muy relacionada con la pendiente de la cuesta, de tal manera que se concentran en su mayor parte dentro de la culminación, en una banda estrecha cerca del borde, donde la pendiente es nula o pequeña. Aquí las gnammas son muy abundantes; las más pequeñas se ajustan al borde justo de la cuesta, y son de forma alargada pero retorcida. En las laderas entre 5º y 25º pueden aparecer algún tipo de gnamma asimétrica de poca dimensión, de hasta 4 m de diámetro y 1'5 m de profundidad, con voladizos de 30 cms. Excepcionalmente aparecen en zonas llanas, en cuevas muy bajas y erosionadas, grandes pans de 5-7 m de diámetro, generalmente alargadas, con alturas de hasta 2 m. Dentro de su fondo se están formando otras más pequeñas.

- *Gnammas de bordes tendidos. ("Spread rim gnammas")*. Son depresiones cerradas amplias, poco profundas (<0'5 m), alargadas, de perímetro irregular aunque tendiendo a ser elipsoidales. Son muy frecuentes en cuevas aisladas de baja altura y de pendiente suave que emergen de los prados. Muchas de ellas se encuentran total o parcialmente rellenas de arenas donde arraiga la vegetación. Puede aparecer también un tipo mixto de gnamma de paredes algo más pendientes.

- *Gnammas en vertiente o "armchair"*. Generalmente son de grandes dimensiones, con sección transversal circular, aunque a veces aparecen con fondo plano. Se sitúan en vertientes, algo alargadas según la estratificación. Son frecuentes aunque no especialmente abundantes.

- *Gnammas gigantes alargadas*. Realmente se trata de una subvariedad de las "armchair", pues aparecen en las vertientes, aunque son de dimensiones mucho mayores, desarrolladas a lo largo de la estratificación, pues llegan a alcanzar 30-40 m de longitud y 4 m de anchura máxima, pues a los lados se estrechan gradualmente. Normalmente estas depresiones se hallan rellenas de arenas que dan un suelo plano y recubierto de arbustos y matas de robles. En planta suelen tener forma de V muy abierta, pues está condicionada por los afloramientos de los estratos.

Controles que condicionan la morfometría y localización de las gnammas

Sin descartar que pueda haber otros factores, los principales controles que se observan en campo son los siguientes:

a) Buzamiento y dirección de las capas

La mayor parte de las gnammas de tipo "pans" se localizan en las cumbres de poca pendiente de las cuevas de cierta altura. Las de borde tendido aparecen también en pendientes subhorizontales aunque en cuevas bajas. Las gnammas de grandes dimensiones y de vertiente se sitúan casi siempre en las laderas entre 10º y 25º de pendiente. Los canales casi siempre aparecen en vertientes.

Aunque no se han hecho medidas estadísticas suficientes, es clara la relación entre el eje mayor de las elipses que suelen dibujar estas formas en planta con la dirección de máxima pendiente de la cuesta, es decir, con la dirección de buzamiento. En segundo lugar influye la dirección de la capa o la dirección de su afloramiento, habiendo muchas con el eje mayor orientado de ONO-ESE ó OSO-ENE, sobre todo en las gnammas que empiezan a formarse.

b) Fracturación

La fracturación explica la orientación de otras, aunque es significativamente menos importante. En los pasillos o corredores, sin embargo, la fracturación y las juntas de estratificación influyen tanto o más que la dirección de máxima pendiente. Puntualmente, se observa como los anillos de Wilson y otras formas de entronamiento diagenético pueden también condicionar su localización y forma. (Fig. 4)



Figura 3. (Foto) Pan asimétrico con voladizo que presenta dos canales a diferentes alturas.
Dissymmetrical pan presenting two channels with different heights.

3.5 Pasillos o corredores

Surcando el dorso rocoso de las cuevas aparece una red de pasillos muy numeroso que comunican unas gnammas con otras o, simplemente, constituye un sistema natural de drenaje lineal entallado en la superficie de la roca, sin relación alguna con aquellas formas. Aunque no son gnammas propiamente dichas, constituyen un relieve muy interesante que está íntimamente relacionado con ellas, genéticamente y funcionalmente. Individualmente, su longitud es variable, dependiendo lógicamente de las dimensiones de la cueva, aunque es relativamente frecuente que adquieran más de 20 m y 40 m si son oblicuos a la pendiente. Dan lugar, como se ha dicho, a una red de drenaje con canales principales y afluentes, que drenan prácticamente el 80% de la superficie de la roca.

Hay gnammas que tienen dos pasillos, uno superior abandonado, y otro inferior funcional, que indica la profundización acelerada de la alteración hacia abajo. Se observa también como algunos de estos canales tienen en su lado sur un voladizo parecido al de las gnammas, lo cual parece sugerir que aunque son formas básicamente diferentes, tienen evidencias que las hacen ser genéticamente semejantes.

En la vertiente, por lo general, tienden a disponerse según la dirección de máxima pendiente, aunque se hallan muy ligadas también a la orientación del diaclasado, a la estratificación y a la malla poligonal que forman las grietas poligonales, como se ha dicho anteriormente.

Los canales adquieren un notable desarrollo cuando son el desagüe de gnammas de vertiente de gran envergadura, o cuando la red de drenaje externa a la cueva cruza ésta de manera perpendicular, entallando un pasillo en la roca. Algunos de estos pasillos han quedado colgados en el frente, debido al rebajamiento diferencial del terreno, más acusado en los materiales arcillosos que en las areniscas. En otros casos, se ha observado como la evolución de la red entrecruzada de canales ha dado lugar a un pavimento en areniscas ("sandstone pavement"), con la formación de células convexas de 3-5 m de diámetro y 1'5 m de altura.

4. Consideraciones genéticas

En lo que sigue no se pretende analizar y demostrar de manera exhaustiva las causas del origen de estas formas del relieve, sino más bien de describir algunos hechos y observaciones que están relacionados con sus génesis. El estudio global de los procesos y mecanismos genéticos hubiese requerido un apoyo analítico de la roca fresca, encostramientos superficiales y productos de alteración (residuo sólido y agua de la gnammas, concreciones, escamas y eflorescencias salinas de los tafonis, etc) que aquí en gran parte no se han hecho.

4.1 Cavidades en la base del frente de las cuevas

En este trabajo se quieren apuntar algunas ideas generales sobre el desarrollo de las cavidades, basadas en las características petrofísicas de la roca y en las observaciones realizadas en campo, donde se ve que estas cavidades, de forma generalizada, sufren descamaciones en las costras ferruginosas, que se presentan total o parcialmente desprendidas en algunos casos, y en otros, sin embargo, se observa su formación incipiente.

En los estudios que han tratado el origen de este tipo de formas (Robinson y Williams, 1976, 1994; Twidale y Campbell, 1992), se señalan diversos factores que influyen en su formación: presencia de rocas más blandas en la base que son más fácilmente alterables, erosión eólica, efecto del agua que sube por capilaridad y del haloclastismo, desprendimientos debido a la alteración, etc. Se remarca que, independientemente de cual sea el proceso, la principal causa es el aumento de la humedad en la parte inferior de la roca.

Benito et al. (1993) estudian los procesos de alteración que afectan a las cavidades con pinturas rupestres de la Sierra de Albarracín, entre los que destacan la alteración por sales y la disolución de la sílice.



Figura 4. (Foto) Pans retorcidos relacionados con estructuras diagenéticas de la arenisca.
Pans in sandstones diagenesis structures.

Sancho et al. (1994) estudian la alteración de la arenisca de las pinturas rupestres de El Cogul (Lérida), donde se comprueba que las formas y productos de alteración están relacionados con procesos de haloclastismo y la fijación en la superficie de la arenisca de sustancias de diversa naturaleza.

Como se sabe, las características petrofísicas influyen de gran manera en los procesos de meteorización; se han hecho en este sentido diversos estudios basados en trabajos de laboratorio con diversos tipos de roca, donde se destaca la importancia de la humectación, la crioclastia, etc. en la formación de la alveolización (Cooke y Warren, 1973; Williams y Robinson, 1981; Fahey, 1983; Sperling y Cooke, 1985).

En este sentido, las características petrofísicas de las areniscas de Valonsadero, estudiadas por Fort y Bustillo (1990), muestran un alto grado de absorción de agua, especialmente en su forma de absorción libre y de capilaridad. La absorción libre se realiza sobre todo por el agua de rocío y la capilaridad es debido al ascenso del agua a través de los poros a partir del contacto con el suelo, generalmente bastante humedecido y con un nivel freático somero (entre 0 y 5 m aproximadamente, según el inventario de puntos de agua realizado en la zona de Pedrajas) y Valonsadero; se alcanzan así alturas por capilaridad entre 30 y 50 cms. La absorción de agua depende mucho del contenido en matriz arcillosa, siendo alta si la meteorización de la roca es mayor.

En cuanto a los ensayos de alterabilidad (Fort y Bustillo, 1990), las variaciones de humedad-sequedad muestran incidencias muy bajas sobre la degradación de la roca, perdiendo sólo el 0'5% de su masa. Los procesos de hielo-deshielo son los que producen una mayor degradación de las areniscas, observándose pérdidas de masa significativas (hasta el 17%). Según los ensayos de envejecimiento artificial acelerado realizados por Álvarez de Buergo et al. (1991), la pérdida de masa de las muestras de arenisca de monumentos románicos de Soria procedentes de Valonsadero sometidas a los ciclos de cristalización de sales fue de 0'13-0'21% y en el caso de ciclos de hielo-deshielo fue de 0'19-0'30%, es decir, en ambos casos no se produce un deterioro significativo.

El desarrollo de los abrigos parece estar ligado a la absorción del agua por las areniscas (rocío, lluvias, vapor de agua y, sobre todo, el agua del suelo que sube por capilaridad), produciendo una mayor alteración en los feldespatos. Según Fort y Bustillos (1990), los feldespatos de las muestras recogidas de los abrigos están más alterados que los del resto del macizo rocoso. Aunque no se tienen casi datos ni se ha estudiado, la cristalización de sales podría tener un papel relevante.

Por otra parte, es muy corriente que las paredes de estos abrigos estén tapizadas de costras ferruginosas formadas por la migración de óxidos de hierro a las zonas superficiales de la roca durante la evaporación del agua de la zona basal. El agua subterránea que sube por la capilaridad tiene ya alto contenido en hierro tal como se observa en los numerosos manantiales y sondeos de la zona, algunos de los cuales no han podido ser utilizados por este motivo para el abastecimiento humano. Este encostramiento, aunque de débil espesor (mm) se observa en un gran número de monumentos románicos de Soria, construidos en la piedra procedente de las canteras de Valonsadero, lo que demuestra que el encostramiento es un proceso rápido, dentro del rango histórico. La alteración se hace más o menos patente en bastantes de ellos, como en la Iglesia de Santo Domingo (Álvarez de Buergo et al, 1991), Palacio de los Ríos y de la Audiencia. En las columnas de los arcos del Monasterio de San Juan de Duero, la humedad ha subido por capilaridad hasta más de 1 m de altura. Entre la costra y la roca alterada se produce una mayor absorción de agua pues es una zona débil, abierta, que posteriormente se descama. Este proceso puede considerarse también como histórico pues varias pinturas rupestres neolíticas dibujadas sobre la costra se han desprendido (Ortego, 1983). Es posible que la arenisca alterada, al quedar al descubierto, absorva más agua y favorezca la formación de otra costra ferruginosa, que con el tiempo se llegará a desprender. La repetición de este proceso produce un aumento de la profundidad de las cavidades.

Hay que señalar que todos estos mecanismos son más rápidos en las zona bajas, donde hay una mayor absorción de agua capilar, dando lugar a sobreplosos que, cercados, dan lugar a cerramientos de ganado. (Basal Saping) (Mabbut, 1977). Aunque los ciclos de hielo-deshielo inhiben algunos de los procesos de alteración mencionados, también deben favorecer la meteorización en los abrigos, dada las severas condiciones climáticas de la zona y la susceptibilidad de la roca a la degradación mecánica tal como se evidencia en los ensayos de laboratorio realizados. Ello estará también favorecido por la humedad de la roca y por la orientación en umbría de los frentes de cuesta, más expuestos a los frecuentes vientos fríos del N.NO, lo que favorece la intensidad y persistencia de las heladas, así como el transporte de las distintas partículas disgregadas.

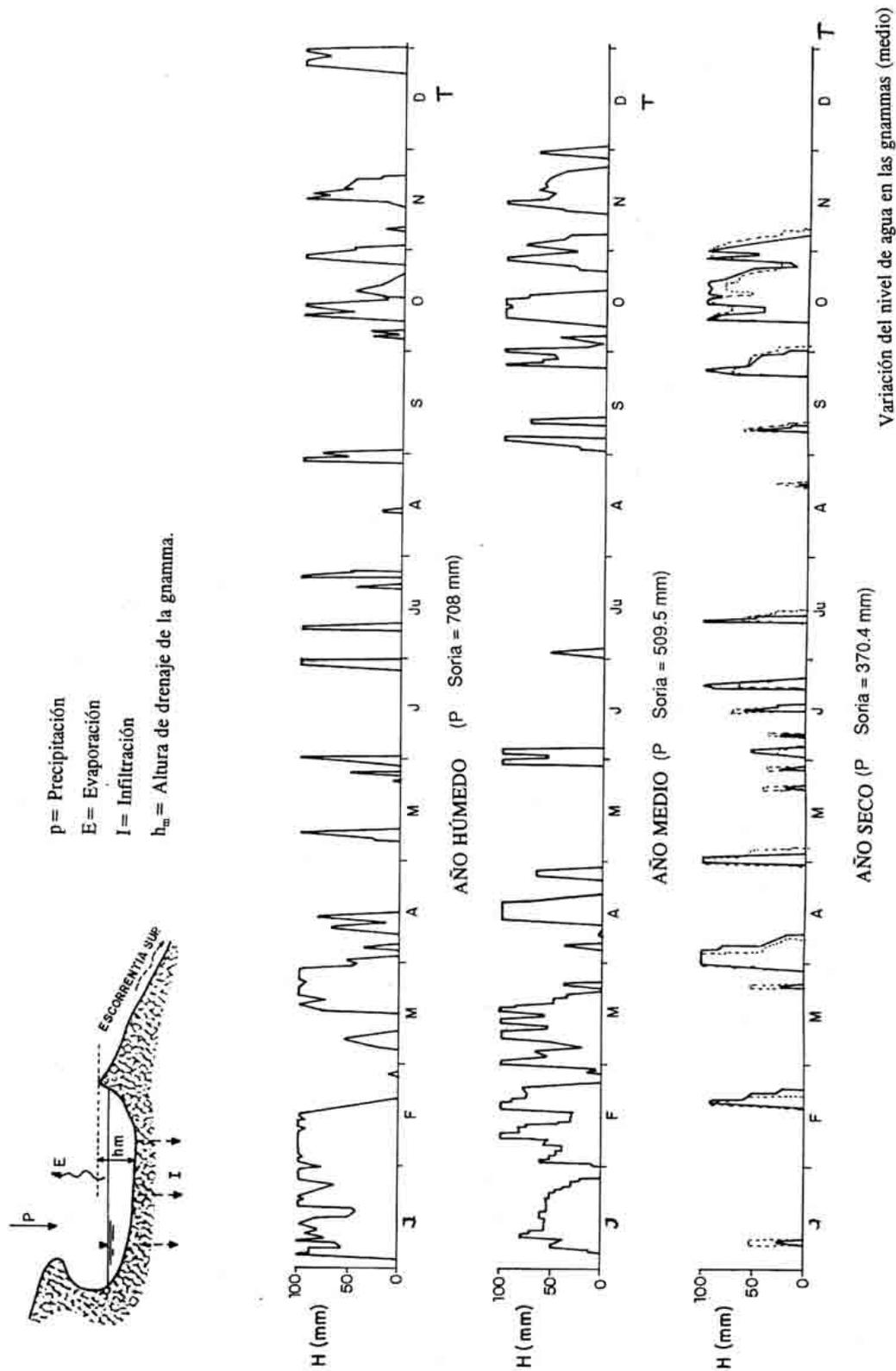


Figura 5. Variación del agua almacenada en las gnammas de Valonsadero (Soria).
 Calculated variations of the water stored in the gnammas of Valonsadero (Soria).

4.2. *Los tafonis*

Como se sabe, los procesos iniciales de formación de los tafonis están relacionados con diversos factores que condicionan la intensidad de meteorización en puntos concretos de la roca: diferente grado de cementación o contenido en matriz arcillosa, presencia de debilidades estructurales o texturales, las cuales favorecen la absorción de agua y la eficacia de los procesos de hielo-deshielo (Mabbut, 1977) (Hollermann, 1975) (Martini, 1978) (Mustoe, 1983) (Vidal Romaní, 1983). En la zona de estudio se han observado la presencia de tafonis asociados a juntas de estratificación y a la estratificación cruzada, por ejemplo.

Es de destacar en ámbitos cercanos al nuestro (Depresión del Ebro), aunque con condiciones climáticas distintas y características petrológicas algo diferentes, los trabajos de Rodríguez y Navascués (1982), donde se relacionan la litología, el clima y los factores biológicos en la génesis y desarrollo de la tafonización. Sancho y Benito (1990) demuestran mediante la aplicación estadística, como la tafonización está controlada por la inclinación de la superficie, la existencia puntual de feldespatos y por otro lado, los fenómenos de haloclastismo y de humectación y secado. Tena et al. (1984) estudian la influencia de la cristalización de las sales, y Sancho y Gutiérrez (1990) proponen una clasificación morfológica de los tafonis en base al análisis de los factores geométricos, mineralógicos y/o texturales que controlan las diferentes tipologías.

Álvarez de Buergo et al. (1991) indica que se han observado en las muestras de areniscas de Valonsadero procesos de disolución tanto del cemento filosilicatado, como de los feldespatos potásicos. También han detectado sales solubles, como sulfatos cristalizados sobre feldespatos, HCO_3^- , Ca^{++} , K^+ , Mg^{++} y Na^+ .

Aunque no se ha estudiado, el haloclastismo y la disolución deben jugar seguramente un papel importante en los procesos y mecanismos genéticos de los tafonis y, en cambio, la gelifracción debe inhibir su desarrollo.

4.3. *Las grietas poligonales*

El origen de este tipo de formas no está bien conocido aunque existen diversas interpretaciones. Por un lado, Netoff (1971) propone que se han formado por procesos de desecación en areniscas con alto contenido en arcilla. Robinson y Williams (1989) sugieren que son el resultado de cambios de temperatura o de humedad verificados durante o después de la formación de una costra superficial rica en arcilla y en cemento silíceo. Para areniscas con elevado cemento silíceo en las capas externas, Branagan (1983) explica que esta "tesselation" es debida a esfuerzos superficiales que, actuando a lo largo del tiempo producen grietas de fatiga, tal como se observan en los vidrios antiguos. En todo caso parece que la génesis de estas formas está íntimamente ligada a la presencia y formación de una corteza endurecida en la roca. Se sugiere así que la evaporación del agua de los poros de la parte externa de la arenisca favorece el depósito de sílice que se seca y encoje (Young y Young, 1992).

En nuestra zona de estudio parece ser que estas formas no son actuales, sino subactuales pues en numerosos puntos, la corteza ferruginosa a la que están asociadas está erosionada, sus lados colonizados por musgos y líquenes que van agrandando los bordes y, en otros casos, la erosión lineal los ha profundizado claramente, lo que ha originado el desarrollo de una red de canales de drenaje con dibujo en malla poligonal.

4.4. *"Gnammas" y pasillos*

Las "gnammas" en areniscas se forman en condiciones climáticas muy distintas aunque, por lo general, se citan mecanismos de formación semejantes. Al igual que en los tafonis, y aprovechando debilidades texturales y estructurales, los procesos más importantes son los de disgregación granular, la descamación y el haloclastismo en ambientes secos y cálidos con intensa evaporación. La disolución es, en otros casos, el principal mecanismo de formación. Así, Gutiérrez y Ibáñez (1979) consideran que el proceso genético más importante en la formación de las "gnammas" de Alcañiz es la disolución, ya que la arenisca es eminentemente calcárea. Otros trabajos que tratan sobre el origen de estas formas podemos encontrarlos en Fränzel (1971), Bakhaus (1972), Twidale (1980), Alexandrowicz (1989), Robinson y Williams (1992).

En Robinson y Williams (1994) se explica como en granitos y areniscas arcóscicas la hidrólisis de los feldespatos es probablemente un proceso importante. En cuarzoarenitas el origen de las gnammas es más dudoso. El proceso dominante para muchos investigadores es la disolución química o bioquímica de los granos y cemento de la arenisca, aunque el mecanismo concreto no está todavía aclarado. Es incierto también la influencia de los procesos mecánicos aunque parece que la gelifracción también interviene (Matthes, 1930; Dahl, 1966). Los líquenes (Fränzle, 1971) contribuyen a la disgregación granular en la base de las gnammas. En algunas areniscas las gnammas se desarrollan por la descamación de la costra dura superior y la excavación de la roca blanda del interior.

Aunque no se han estudiado en detalle los procesos que pueden haber intervenido en la formación de estas gnammas, y para lo cual habría que haber realizado diversos análisis, tal como se ha dicho anteriormente, se quieren apuntar algunas observaciones que seguramente están relacionadas con su génesis:

- 1º) En nuestra zona, y según la clasificación de arcosa de la roca, parece que la hidrólisis de los feldespatos podría jugar un papel importante.
- 2º) Meteorización biológica: Es muy frecuente que en la parte inferior de las paredes de las gnammas existan musgos que pueden producir un efecto de arenización. Los ácidos húmicos de estos musgos y la materia orgánica en descomposición (hojas de robles, sobre todo, que se concentran en las aguas estancadas de las piletas) deben producir aguas agresivas con gran capacidad de disolución.
- 3º) Se desconoce el efecto del haloclastismo.
- 4º) Según los ensayos de laboratorio recopilados de la bibliografía, la descamación por humectación-secado y el hielo-deshielo, o el efecto combinado de los dos podría producir así mismo una liberación de partículas que hay que tener en cuenta.
- 5º) Independientemente de los mecanismos formadores de las gnammas, parece que la presencia del agua favorece la mayor parte de los procesos de alteración. Como la disgregación de la roca puede estar en función del tiempo de permanencia del agua en las gnammas, se ha realizado una estimación del número de días que estos pilancones están encharcados. Para ello se va a efectuar en una gnamma ideal (Fig. 5) un balance hidrológico establecido por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } H_i \leq h_m \longrightarrow H_i = H_i + P_i - E_i - I_i$$

$$\text{Si } H_i > h_m \longrightarrow H_i = h_m$$

donde

H_i = Altura del volumen de agua almacenado en el periodo i (mm)

h_m = altura del desagüe de la gnamma con respecto a su fondo ($h_m = 10$ cm)

P_i = precipitación diaria expresada en mm en el periodo i

E_i = evaporación diaria expresada en mm en el periodo i

I_i = infiltración diaria expresada en mm en el periodo i

Se trata de un balance simplificado pues no se tiene en cuenta, por ejemplo, ni el agua sustraída por capilaridad, ni la desecación que sufre la roca durante la evaporación.

Los cálculos se han efectuado para un pilancon de 1 m^2 de superficie, con una altura media de desagüe con respecto al fondo de la gnamma de 10 cm, acorde con la realidad. Se ha considerado una infiltración del 4% del agua almacenada, según los ensayos de absorción libre de agua (Fort y Bustillo, 1990). Se han utilizado los datos de precipitación y evaporación diaria de la estación de Soria, y se ha ensayado para tres años representativos de periodos húmedos, secos y medios. Los resultados obtenidos se reflejan en la Fig. 5, donde se puede ver la variación de volúmenes de agua almacenado en la gnamma para los tres tipos de años considerados. Los resultados teóricos han sido verificados durante el año 1992 mediante la medida de volúmenes de agua en varias gnammas de una cuesta cercana a Pedrajas, donde se pudo ver que las variaciones eran similares. (Fig. 5)

Los resultados obtenidos hay que considerarlos mínimos por las siguientes razones: 1º No se considera la entrada de agua de escorrentía superficial, que es muy importante como se ha explicado anteriormente al describir los pasillos. 2º La estación meteorológica de Soria es la más calurosa y seca de la zona. 3º No se considera tampoco otras fuentes de agua, como el rocío, escarcha, y el efecto de almacenamiento que

producen los musgos. 4º No se ha tenido en cuenta el efecto de retraso que supone la congelación del agua y las precipitaciones en forma de nieve. Por estas razones, creemos que hay que considerar el año húmedo en la estación de Soria como el representativo de la zona de estudio.

De cualquier manera, los resultados son muy ilustrativos y nos indican que el 44% de los días del año (161 días), hay presencia de agua en las gnammas. Para un año medio en la estación de Soria desciende al 42% (154 días, con 102 días de lluvia), y para un año seco, en la misma estación, desciende al 30% (108 días, con 93 de lluvia). La susceptibilidad de estas areniscas a la disgregación granular por la acción directa del agua ha quedado fehacientemente comprobada en el Pantano de la Cuerda del Pozo, donde numerosas cuevas sumergidas han quedado desmoronadas en menos de 20 años, dando lugar a espléndidas playas, sobre todo en las orillas meridionales, donde la acción del oleaje generado por los vientos del norte han contribuido sin duda a su erosión. Los procesos de secado en las gnammas son mucho menos numerosos, aunque si consideramos los 10 primeros centímetros de las paredes, éstos son muy frecuentes, pues el nivel está casi siempre variando. Si a estos efectos añadimos el de las heladas, que se solapan bastante en el tiempo con el de la permanencia del agua, se explica la acción intensa de la meteorización, sobre todo en las partes inferiores, que pueden traer como consecuencia la profundización progresiva de los pilancos y el retroceso de sus paredes, con la consiguiente formación de voladizos.

Se observa también que las gnammas de mayores dimensiones parecen ser subactuales pues tienen los bordes algo erosionados y hay gnammas más pequeñas en su fondo.

La circulación superficial del agua a través de las trazas de diaclasas y planos de estratificación, o según la dirección de máxima pendiente, va iniciando pasillos en donde suelen crecer los musgos, que a su vez favorecen la meteorización lineal; se pueden observar toda clase de pasillos con diferentes estados de desarrollo. Como la humedad se concentra en el lado de inferior, dentro del mismo pasillo, el ataque resulta allí más importante, dando lugar a una sección asimétrica, y con la formación de un voladizo, que en algunos casos está en proceso de destrucción.

Los pasillos se han formado a veces por la coalescencia de varias gnammas alineadas, aunque también puede darse el caso contrario: que las gnammas, aprovechando puntos de debilidad dentro del pasillo, se hayan instalado en ellos.

La mayoría de las gnammas están asociadas a pasillos, lo que indica que en ciertos momentos la precipitación es mayor que la evaporación y que se necesita por tanto la evacuación del agua sobrante como escorrentía superficial. Es frecuente encontrar arenas en el fondo de estas piletas, pues los finos (arcillas y limos) han sido evacuados por el aliviadero. Solo las gnammas más pequeñas pueden estar aisladas. Lo normal es que el drenaje se efectúe en su mayor parte hacia el dorso de la cuesta, aunque en las inmediaciones del borde puede realizarse hacia el frente.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los dos revisores anónimos por todas las sugerencias e indicaciones realizadas que han servido para mejorar notablemente el trabajo, sobre todo en lo referente a la nomenclatura y condiciones genéticas de algunas formas de modelado.

Referencias bibliográficas

- Alexandrowicz, Z.** (1989): Evolution of weathering pits on sandstones tors in the Polish Carpathians.- *Z. Geomorph. N.F.* 33 : 3, 275-289.
- Álvarez de Buergo, M.; García, M.A.; Prendes, N. y Soriano, J.** (1991): *Estudio de la degradación de los materiales pétreos de la Iglesia de Santo Domingo* (Soria, España). Ingeniería Civil. Núm. 81, 53-62.
- Backhaus, E.** (1972): Die geologische Deutung der Felsschüsseln ("Opfersteine") im Buntsandstein der Pfalz, mittels Stoffwanderungen.- *Mitt. Pollichia* 19 : 72-96.
- Benito, G.; Machado, M.J. y Sancho, C.** (1993): Sandstone weathering processes damaging prehistoric rock paintings at the Albarracín Cultural Parck, NE Spain. *Environmental Geology*, 22 : 71-79.
- Beuther, A.; Dahm, H.; Kneuper-Haak, F.; Mensink, H. y Tischen, G.** (1965): Der Jura und Wealden in Nordost-Spanien, *Beih. Geol. Ib.*, 44, 225 págs.

- Branagan, D.F.** (1983): Tesselated pavements. In: Young RW, Nanson G.C (eds) *Aspects of Australian Sandstone landscapes*. Aust. NZ Geomorphol Grp, Wollongong, pp. 11-20.
- Cooke, R.U. y Warren, A.** (1973): *Geomorphology in Desserts*. Auchar Press, London. 394 p.
- Dahl, R.** (1966): Block fields, weatering pits and tor-like forms in the Narvik Mountains, Nordland, Norway. *Geografiska Annaler*, 45 A, 55-85.
- Fahey, B.D.** (1983): Frost action and hydration as rock weathering mechanisms on schist : a laboratory study. *Earth Surfare Processes and Landforms*, 8 : 535-545.
- Fort, R. y Bustillo, M.** (1990): *Estudio de la degradación en las areniscas de Valonsadero (Soria) y su incidencia en las pinturas rupestres (Abrigos de El Tubo y El Mirador)*. Ayuntamiento de Soria. 57 págs.
- Fränzle, O.** (1971): Die Opferkessel im quarzitischen Sandstein von Fontainebleau.- *Z. Geomorph.* 15, 2: 212-235.
- González Yélamos, J. y Sanz, E.** (1994): Hidrogeoquímica de los manantiales sulfhídricos y ferruginosos de las facies Purbeck-Weald del Noroeste de la Cordillera Ibérica (provincia de Soria). *Estudios Geol.*, SO : 215-228.
- Gutiérrez, M. y Ibáñez, M.J.** (1979) : Las "gnammas" de la región de Alcañiz. *Estudios Geológicos*, 35: 193-198.
- Höllermann, P.** (1975) : Formen Kavernöser verwitterung (tafoni) añif Teneriffa. *Catena*, 2 : 385-410.
- IGME** (1988): Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 317 (Vinuesa). *Memoria*, 41 págs.
- IGME** (1991): Mapa geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 350 (Soria). *Memoria*, 70 págs.
- Mabbutt, J.A.** (1977): *Desert landforms*. MIT. Press, Camberra, 340 p.
- Martini, J.P.** (1978): Tafoni weathering, with examples from Tuscany, Italy. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 22 : 44-67.
- Matthes, F.E.** (1930): *Geologic history of the Yosemite Valley*. United States Geological Survey, Proffesional Paper, 160.
- Mustoe, G.E.** (1983): Cavernous weathering in the Capitol reef desert, Utah. *Earth surface processes and landforms*, 8 : 517-526.
- Netoff, D.I.** (1971): Polygonal jointing in sandstone near Boulder, Colorado. *Rocky Mtns. Assoc. Geol.* 8: 17-24.
- Ortego Frías, T.** (1953): Por la vega del río Pedrajas : otras estaciones de arte rupestre, *Celtiberia*, nº 66, 209-216.
- Palacios, P. y Sánchez Lozano, R.** (1885): La formación Wealdense en las provincias de Soria y Logroño, *Not. Com. Map. Geol. Esp.*, 12, 109-140.
- Robinson, D.A. y Williams, R.B.** (1976): Aspects of the geomorphology of the sandstone cliffs of the central Weald. *Proceedings Geological Association*, 87, 93-100.
- Robinson, D.A., & Williams, R.B.** (1989): Polygonal cracking of sandstone at Fontainebleau, France. *Z Geomorphol.* 33 : 59-72.
- Robinson, D.A. y Williams R.B.** (1992): Sandstone weathering in the High Atlas, Marocco.- *Z. Geomorph.* N.F. 36 : 4, 413-429.
- Robinson, D.A. y Williams, R.B.** (1994): *Rock Weatering and Landform Evolution*. John Wiley & Sons Ltd. p. 380.
- Rodríguez, J. y Navascués, L.** (1982): La tafonización de las areniscas miocenas en los alrededores de Huesca. *Tecniterrae*, 19 : 7-12.
- Sáenz, C.** (1933): Notas para el estudio de la facies weáldica española. *Congreso para la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias*, Sección IV, 59-76.
- Sáenz, C.** (1951): Marco geográfico de la Altimeseta Soriana. *Celtiberia*. Nº 1, pp. 69-80.
- Sancho, C. y Benito, G.** (1990): Factors controling tafoni weathering in the Ebro basin (NE Spain). *Z Geomorphol*, 34 : 165-177.
- Sancho, C. y Gutiérrez, M.** (1990): Análisis morfogenético de la tafonización de la arenisca de Peraltilla (Anticlinal de Barbastro, Depresión del Ebro): Influencia de los factores mineralógico-texturales. *Cuaternario y Geomorfología*, 4. pp. 131-145.
- Sancho, C.; Peña, J.L.; Mata, M.P. y González, J.R.** (1994): Estudio alterológico de la arenisca soporte de las pinturas y grabados de la roca de los Moros de El Cogul (Lleida). *Cuaternario y Geomorfología*, 103-118.

Alteración y modelado de las areniscas de la Facies Purbeck-Weald 61

- Sanz, E.** (1994). El micromodelado de las areniscas de Valonsadero (Soria). *Geomorfología en España*, pp. 91-105.
- Sperling, C.H.B. y Cooke, R.U.** (1985): Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallization and hydration processes in hot, arid environments. *Earth surface processes and landforms*: 10, 541-555.
- Tena, J. Mandado, J. y García Anquela, J.** (1984): Influencia de la recristalización de sales en los procesos de meteorización subárea en el valle del Ebro. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10 : 189-200.
- Twidale, C.R. y Corbin, E.M.** (1963): Gnammas. *Revue Geomorphologie Dynamique*, 14: 1-20
- Twidale, C.R.** (1980): Origin of some minor sandstone landforms. *Erdkunde* 34 : 219-224.
- Twidale, C.R. y Campbell, E.M.** (1992): On the origin of pedestal rocks. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF 36, 1-14.
- Vidal Romani, J.R.** (1983): *El cuaternario de la provincia de La Coruña. Geomorfología granítica. Modelos elásticos de formación de cavidades*. Tesis Doctoral. Editorial de la Universidad Complutense de Madrid., 283 p.
- Williams, R.B.G. y Robinson, D.A.** (1981): Weathering of sandstone by the combined action of frost and salt. *Earth Surf. Proc. Land.*, 6 : 1-10.
- Young, R. y Young, A.** (1992): *Sandstone Landforms*. Sping-Verlag, Berlin, Heidelberg. 163 págs.