

JOSÉ LUIS GARCIA RAYEGO

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Castilla-La Mancha

Modelados de detalle en roquedos cuarcíticos de áreas de montaña media apalachense de la Meseta sur y Sierra Morena oriental

RESUMEN

A pesar de la gran dureza del roquedo en el área estudiada, se ha organizado sobre él un conjunto de formas de erosión y de acumulación, de gran modestia, que guardan cierta analogía con elementos reconocidos en el relieve kárstico y en el relieve granítico. La red de fracturación y diaclasado, y los planos de estratificación, constituyen la trama por la que el agua ha ido disolviendo y arenizando el roquedo cuarcítico paleozoico. Todo parece indicar que estos procesos actuaron con particular intensidad en épocas anteriores de clima más húmedo y más cálido.

RÉSUMÉ

Modèle de détail sur roches quartzitiques dans la montagne moyenne appalachienne de la Meseta méridionale et de Sierra Morena orientale.- Malgré la grande résistance des roches dans la région étudiée, il s'est développé sur elles un ensemble de formes érosives et d'accumulation d'une taille modeste qui gardent une analogie avec des éléments des modelés karstique et granitique. Le réseau de fracturation, et les joints de stratification, constituent le canevas que l'eau a profité pour dissoudre et aréniser les quartzites paléozoïques. Tout semble indiquer que ces processus ont agi avec une particulière intensité pendant des périodes précédentes de climat plus humide et plus chaude.

ABSTRACT

Small landforms on quartzitic rocks in the Appalachian middle altitude ranges of Southern Meseta and Eastern Sierra Morena.- Although the great resistance to denudation agents of quartzitic rocks in the studied area, there is a set of both erosional and depositional small forms which are similar to karst and granite landforms. Water, which is the main agent of weathering, has dissolved and arenisated Palaeozoic quartzites, process in which fracturing and joints network have played an important role. It is probable that these chemical weathering had more importance in the past when climate conditions were warmer and more humid.

Palabras clave / Mots clé / Key words

Modelados de detalle, cuarcitas, meteorización-disolución, montaña media apalachense, Meseta sur ibérica.

Modèle de détail, quartzites, météorisation-dissolution, montagne moyenne appalachienne, Meseta méridionale ibérique.

Small landforms, quartzites, weathering-dissolution, Appalachian ranges, Iberian Southern Meseta.

I

INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

LAS cuarcitas siempre han sido consideradas, con razón, unas de las rocas más duras e inalterables (TRICART, 1977; BIROT, 1981) y han dado lugar en donde su

presencia es muy abundante y alterna con las pizarras a uno de los más típicos relieves de erosión diferencial: el relieve apalachense. En las sierras interiores de la Meseta Sur los rasgos fundamentales de este tipo de relieve del zócalo paleozoico se mantienen constantes en una extensión que supera los 15.000 km². Desde las Villuercas, los Montes de Toledo, los Montes de Ciudad Real,

el Campo de Calatrava hasta el valle de Alcuía y Sierra Morena oriental, aunque otros elementos litomorfológicos varíen en mayor o menor medida, la presencia y el ritmo de las cuarcitas del Ordovícico inferior aseguran estos caracteres básicos del relieve. En estas rocas se modelan sistemáticamente las principales cumbres serranas, sobre todo en los afloramientos de los estratos cuarcíticos pertenecientes al Tremadoc y al Arenig.

Hasta ahora las formas generadas por la meteorización en estas cuarcitas que han llamado más la atención de los geomorfólogos han sido las relacionadas con la gelifracción, proceso que se ha considerado muy activo durante el Cuaternario y con el que se ha relacionado la génesis de grandes mantos coluviales por todas las vertientes y en especial de las acumulaciones de clastos sueltos conocidos como pedrizas. Esta fragmentación por congelación-deshielo, que aprovecha la generalizada fracturación y diaclasamiento de los bancos cuarcíticos culminantes, suele producir clastos angulosos en forma de paralelepípedo, cuyo desprendimiento confiere a las cumbres una característica morfología de riscos escarpados, de aspecto ruiforme y acastillado (MUÑOZ JIMÉNEZ, 1976; TELLO RIPA, 1986). Sin embargo, sólo se han citado muy escasamente otras formas de detalle, «caprichosas» y relativamente variadas, no relacionadas con la crioclastia que en numerosas ocasiones se encuentran en estas mismas cumbres apalachenses (GARCÍA RAYEGO, 1994). En trabajos anteriores nosotros hemos señalado su existencia y su muy probable relación con procesos de alteración, pero no las hemos analizado de forma pormenorizada ni abordado su interpretación (GARCÍA RAYEGO, 1994, 1995 y 1997). Por otra parte, también hemos hecho referencia a la meteorización del sustrato de las laderas serranas (GARCÍA RAYEGO y MUÑOZ JIMÉNEZ, 2000), señalando la importancia que en ella tuvieron los fenómenos de meteorización química. Parece pues que tanto en las crestas como en las laderas las cuarcitas *in situ* muestran huellas apreciables de alteración.

También son numerosos los cantos o bloques cuarcíticos incluidos en formaciones detríticas recientes (rañas, coluviones o pedrizas) que se muestran igualmente alterados. Esta meteorización química de los clastos y de su sustrato pizarroso se ha citado con más frecuencia e incluso ha sido estudiada detalladamente en depósitos coluviales empastados (MARTÍN-SERRANO y MOLINA, 1989; MARTÍN-SERRANO, 1991; MOLINA, 1991). Sin embargo, hasta ahora en España no se ha estudiado, que sepamos, ni la alteración de las crestas cuarcíticas ni la de los clastos de cuarcita sueltos de las pedrizas. Sí se

han estudiado en cambio formas de alteración en rocas del género de las areniscas que poseen significativas similitudes con las cuarcitas, sobre todo en la Cordillera Ibérica y en la depresión del Ebro (SANZ PÉREZ, 1994 y 1996; SANCHO MARCÉN, 1996; SANCHO MARCÉN *et al.*, 2004; GUTIÉRREZ ELORZA, 2001).

En el contexto internacional algunos autores se han ocupado de los relieves y los modelados de detalle sobre areniscas (MAINGUET, 1972; YOUNG & YOUNG, 1992). Asimismo, han sido analizadas las formas de meteorización sobre cuarcitas de diversas edades geológicas (Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico), sobre todo en regiones tropicales o subtropicales de Venezuela (URBANI, 1977; GALÁN y LAGARDE, 1988; GALÁN, 1991; DOERR, 1999), Brasil (ERASO ROMERO y TAYLOR DE LIMA, 1990), Argentina (MARTÍNEZ, 2002), Australia (YOUNG & YOUNG, 1992) y Sudáfrica (MARTINI, 1982). Sin duda, las formas más espectaculares de las que se han citado y estudiado hasta el presente son las desarrolladas en las cuarcitas del Grupo Roraima, en Venezuela, dentro de las que se incluyen cuevas, algunas de ellas de gran envergadura y similares a las modeladas sobre rocas carbonatadas. Debido a ello algunos autores llegan a hablar de karst en cuarcitas, aunque reconocen diferencias apreciables con el karst desarrollado en calizas y dolomías.

Al interpretar este peculiar modelado de las cuarcitas de Venezuela hay cierta controversia entre los diferentes autores que lo han estudiado (GALÁN, 1991, DOERR, 1999), centrada en cómo se produce la «karstificación», entendiendo ésta como el paso del drenaje superficial a subterráneo. Sin embargo, en lo que sí hay acuerdo es en la consideración de la disolución de la matriz silíceo (y la consiguiente arenización) como proceso fundamental en la aparición de formas tanto «exokársticas» como «endokársticas».

II ENCUADRE GEOGRÁFICO Y GEOMORFOLÓGICO Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Desde el punto de vista climático toda el territorio analizado en este estudio se caracteriza por poseer un clima mediterráneo de interior (continentalizado), con veranos largos y calurosos (cuatro meses, de junio a septiembre, superan los 20 °C de media) e inviernos frescos e igualmente largos (las medias de diciembre, enero y febrero se sitúan entre los 6° y los 7 °C). Las



FIG. 1. Paisaje general de la umbría de la Sierra de Dormideros. Fisonomía del relieve apalachense.



FIG. 2. Mesa-Cuesta culminante en la solana de la Sierra de Dormideros, densamente «rasgada» por los procesos erosivos.

precipitaciones son irregulares en el tiempo y variables en el espacio y se ven muy influidas por la localización concreta y el relieve, de manera que dentro del área se registran ámbitos secos, con una precipitación media anual de unos 400 mm, y ámbitos subhúmedos, con totales anuales de unos 700 mm o más (GARCÍA RAYEGO, 1995).

Por lo que se refiere a la estructura geológica, los Montes de Toledo, Ciudad Real y Campo de Calatrava y Sierra Morena oriental se incluyen en el extremo SE de la Zona Centroibérica del Macizo Hespérico o Ibérico (COMBA, 1983; VERA, 2004). Los materiales más abundantes en ellos son de naturaleza silíceo (cuarcitas, areniscas, pizarras y conglomerados), datados desde el Precámbrico superior hasta el Carbonífero, aunque predominan los pertenecientes al Precámbrico, Cámbrico, Ordovícico y Silúrico (ROIZ y VEGAS, 1980). Las deformaciones con mayores implicaciones en el relieve a escala territorial son los anticlinales, amplios y vaciados en su mayor parte, y los sinclinales normalmente estrechos, excepto en ciertos sectores donde aparecen cubetas y domos de dimensiones similares (VEGAS y ROIZ, 1979). Por su parte, la red de fracturación, muy densa y muy evidente en litologías cuarcíticas, es destacable sobre todo a escala detallada y tiene un papel relevante en los procesos de meteorización, tanto en los de fragmentación como en los de alteración.

Sobre este entramado estructural se ha elaborado un relieve de configuración apalachense (MUÑOZ JIMÉNEZ, 1976; GARCÍA RAYEGO, 1994) con desniveles que oscilan normalmente entre los 200 y los 600 m. Los modelados más recientes que forman parte de él son las rañas, que ocupan los piedemontes de los valles más

amplios, los glacis más inclinados, que se extienden en las bajas laderas, y los mantos de pedrizas, que recubren las partes altas de éstas. La red fluvial pertenece a las cuencas del Tajo, del Guadiana y del Guadalquivir; en los sectores correspondientes a la primera y a la última se ha encajado en las plataformas de las rañas, desmantelándolas en los casos en los que su trabajo erosivo ha sido más intenso, mientras que en gran parte de los vertientes al Guadiana los ríos discurren por la superficie de éstas sin apenas encajarse.

El territorio en el que se han realizado las observaciones más precisas y del cual se posee un repertorio fotográfico relativamente abundante corresponde a las unidades montañosas que se citan a continuación:

- Sierra Madrona, en las cercanías de Fuencaliente:
 - Sierra de Dormideros (o Dornilleros), cuyas cumbres oscilan entre 1.220-1.328 m de altitud.
 - Sierra de Navalmanzano, máxima altitud de Sierra Morena con 1.332 m.
 - Sierra de Puerto Viejo, con 1.230 m.
 - Sierra Madrona (en sentido estricto), con 1.100-1.301 m entre las cumbres de Almirez y Abulagoso.
- Sierra de las Majadas, en las cercanías de Piedrabuena:
 - Relieve cuarcítico en la transición entre el Campo de Calatrava y los Montes de Ciudad Real, cuyas cumbres se sitúan a 860-880 m de altitud.
- Cerro de La Atalaya, en las proximidades de Ciudad Real capital:
 - Pequeña elevación, que sólo alcanza 715 m de altitud.

Debido a que en ella se registra una gran abundancia de formas de modelado sobre cuarcitas, la Sierra de Dormideros o Dornilleros ha sido objeto de un análisis más detallado. Esta alineación tiene unos 10 km de O a E, manteniéndose sus cumbres por encima de 1.100 m y alcanzando 1.328 m en su cima principal. Los valles que la limitan por el N, el SO y el E son el de Cereceda, el de Fuencaliente y el de Valmayor respectivamente, sobre los cuales destaca netamente puesto que sus fondos sólo llegan a los 600-800 m de altitud. Desde el punto de vista morfoestructural se define como una cresta modelada sobre cuarcitas del Ordovícico inferior e integrada en el flanco meridional del anticlinal de Sierra Madrona, cuyo núcleo de pizarras del Precámbrico se encuentra vaciado y constituye el fondo de los citados valles de Cereceda y de Valmayor.

La parte más elevada de esta Sierra de Dormideros conforma una especie de dorso de cuesta inclinado unos 18-20° hacia el S y modelado sobre el techo de los estratos cuarcíticos del Arenig, que destaca unos 30-40 m por encima de la línea general de cumbres. Este resalte amesetado tiene forma triangular y mide unos 260 m de O a E y unos 100 m de N a S. Todo él se observa en las fotografías aéreas densamente rasgado por fisuras, grietas y callejones que le dan un aspecto de superficie karstificada. Una buena parte de nuestras observaciones y análisis concretos se ha realizado en este sector, pero después de varios años de observaciones nos parece evidente que el modelado que se observa con especial claridad y profusión en él (y en los otros enclaves montañosos antes señalados) se encuentra también a lo largo y ancho del gran territorio de relieve apalachense definido al comienzo; y parece que ni la altitud ni la orientación influyen de modo significativo en su presencia y su desarrollo.

III CARACTERES LITOLÓGICOS Y ESTRUCTURALES DE LOS AFLORAMIENTOS CUARCÍTICOS

En general, los roquedos cuarcíticos aflorantes en los Montes de Toledo y Ciudad Real, en el Campo de Calatrava y en Sierra Morena oriental se encuentran organizados en bancos relativamente potentes (de varios metros o incluso decámetros) muy compartimentados por fracturas y diaclasas ortogonales, que favorecen su disyunción en volúmenes de forma prismática.

Desde el punto de vista estratigráfico pueden distinguirse, por un lado, las cuarcitas del Tremadoc, que se

combinan con conglomerados arcósicos con cantos redondeados, y con areniscas microconglomeráticas con presencia apreciable de feldespatos (PALERO FERNÁNDEZ *et al.*, 1989) y, por otro, la llamada «cuarcita armoricana», datada en el Arenig, que descansa concordante sobre las anteriores. Se compone ésta básicamente de cuarzoarenitas u ortocuarzitas blancas, aunque los autores que hicieron los primeros estudios detallados modernos, por ejemplo en Sierra Morena oriental (BOUYX, 1970; TAMAIN, 1972), ya las desglosaron en dos tramos separados por unos niveles más areniscosos, si bien en otros lugares no se advierte esa diferencia. Los espesores de los materiales del Tremadoc son bastante variables según los diferentes sectores: En Sierra Madrona la potencia es de 75-200 m (PALERO FERNÁNDEZ *et al.*, 1989); en San Benito alcanza unos 150 m (MIRA LÓPEZ *et al.*, 1986); en Almadén oscila entre 200 y 500 m (AGUILAR TOMÁS *et al.*, 1987) y en Piedrabuena, en torno a 300 m (PORTERO GARCÍA *et al.*, 1989). Los autores citados, basándose en sus propios datos y en otros trabajos anteriores, señalan igualmente la continuidad de la cuarcita armoricana, cuya potencia oscila normalmente entre los 300 y los 400 m. Las cumbres principales se labran sobre todo en ésta y en la de los últimos tramos de la del Tremadoc, que muestran un gran analogía con ella (MOLINA CÁMARA *et al.*, 1986).

Petrográficamente, las cuarcitas arenigienses son ortocuarzitas con un porcentaje superior al 95% de cuarzo y con un alto grado de cristalización. El tamaño del grano es de arena fina, subredondeada y con nula o escasa matriz y, cuando la hay, es de tipo sericítico (MOLINA CÁMARA *et al.*, 1986; PALERO FERNÁNDEZ *et al.*, 1989; PORTERO GARCÍA *et al.*, 1989). Teniendo esto en cuenta, los materiales del Tremadoc, sobre todo los de su parte basal, más conglomeráticos y areniscosos, serían más susceptibles a la alteración, mientras que los tramos más propiamente cuarcíticos del Arenig o de la transición entre el Tremadoc y Arenig serían más difícilmente alterables.

Por lo que respecta a la morfología estructural de las crestas rocosas culminantes y también de una buena parte de la ladera es necesario partir de la dicotomía entre los frentes y los dorsos rocosos, en función de si el roquedo aflorante forma parte de lo que hemos venido denominando en trabajos anteriores «frentes de estrato» o «dorsos de estrato» (GARCÍA RAYEGO, 1988, 1994). Esta distinción, que puede aplicarse a la mayoría de las laderas serranas del zócalo apalachense, desde Las Villuercas, Los Montes de Toledo o El Campo de Calatrava

hasta Sierra Morena, es interesante por varias razones. En primer lugar, porque se establecen formas bastante diferenciadas en ambos tipos, que además trascienden también a las formas de detalle que posee cada uno de ellos. Y en segundo lugar, porque su correspondencia con frentes o dorsos influye en las laderas de tal forma que acaba caracterizándolas en su totalidad, pudiéndose señalar que a escalas medias las laderas obedecen básicamente a esta doble tipología: laderas de frente o ladera de dorsos.

Tanto frentes como dorsos de cresta se encuentran densamente fracturados, como ya se ha dicho. Sin embargo, las directrices rectas procedentes de estas líneas de debilidad tectónica desaparecen con frecuencia y toman su lugar fisuras, grietas, ensanchamientos y cavidades cuyas directrices más importantes son líneas curvas.

IV

LOS MODELADOS DE DETALLE EN ROQUEDOS CUARCÍTICOS Y SUS TIPOS

La mayor parte de las formas de detalle a las que aludimos son erosivas, excepto las acumulaciones de arena que se ven más raramente, y se encuentran mayoritariamente en las cumbres de las sierras donde se localizan los duros roquedos del Ordovícico inferior. Dentro del conjunto de las mismas hay formas mayores (de dimensiones decamétricas o, si se consideran en conjunto, hectométricas), formas medias y formas menores (verdaderos micromodelados). En todo caso se trata de modelados de dimensiones muy modestas.

Como se señaló al comienzo, la fisonomía que presentan recuerda con frecuencia a la morfología granítica, por el predominio tanto de concavidades redondeadas como de resaltes de aspecto curvo; además, muchas superficies rocosas muestran desagregaciones al tacto, como ocurre con las rocas graníticas alteradas. En otros casos, sin embargo, guardan muchos parecidos con ciertas formas del relieve kárstico, al ser roquedos sedimentarios estratificados en los que se abren callejones, surcos, etc. En todo caso hay formas graníticas que poseen una fisonomía y una denominación similar a las kársticas como los pavimentos, acanaladuras, mogotes, setas, etc, algunas de las cuales precisamente son las que se han desarrollado sobre las rocas cuarcíticas que aquí se tratan. En efecto, parece que pueden desarrollarse formas similares sobre litologías diferentes (BIROT, 1981) o incluso se habla de convergencia de formas (GUTIÉRREZ ELORZA, 2001).

I. FORMAS MAYORES: LOS DORSOS

Dentro de los modelados que se están considerando en este trabajo las formas de mayor tamaño son los propios dorsos y de éstos hay que partir para entender mejor el resto de los elementos morfológicos. Los dorsos poseen un mayor afloramiento superficial que los frentes o que otros resaltes rocosos y tienen una pendiente no muy alta y las formas resultantes están muy influidas por estas directrices inclinadas-tableadas. En función de su mayor o menor meteorización pueden dividirse en dorsos tabulares y dorsos con perfil redondeado, a los que además hay que añadir las formaciones turriculadas, en las que la fisonomía de dorso ya apenas se observa.

A. Dorsos tabulares

Pueden presentar diferente grado de erosión, pero en general se conserva bien la fisonomía de cuesta y a veces se desarrollan en ellos ciertos elementos o muestran ciertas características que puedan hacer distinguir subtipos como:

a) *Dorsos con pavimentos empedrados.*- Estos dorsos cuarcíticos tienen alguna semejanza con los pavimentos calizos o kársticos (SELBY, 1991). Las pendientes de estos dorsos no suele ser muy grande. Se hallan recubiertos por bloques y cantos «suelos» que forman como pedreras, pero en posición «concordante» con el estrato infrayacente, de modo que este enlosado parece ser realmente el estrato superior o los restos de ese estrato. Incluso parece que estos clastos no se han movido o lo han hecho en muy escasa medida, dada su posición de equilibrio. Esta cubierta de clastos tiene una densidad variable, desde unos pocos bloques y cantos dispersos hasta un recubrimiento importante que puede superar el 50 ó 60% del estrato inferior. Estos clastos en general no suelen presentar microformas de alteración destacadas.

b) *Dorsos con grietas o fisuras poligonales.*- Se trata de dorsos cuarcíticos en los que se aprecia perfectamente su morfología tabular inclinada, pero que se encuentran agrietados por una red de fisuras de anchura centimétrica y que organiza un conjunto de bloques delimitados por esas grietas de trazado curvilíneo. Con frecuencia estos bloques presentan microformas de meteorización de directrices curvas, desagregación, etc. Las grietas son relativamente profundas, más que las señaladas por ejemplo por YOUNG & YOUNG (1992). Y



FIG. 3. Panorama de conjunto de la cuesta culminante de la Sierras de Dormideros. Es un dorso de cresta con «callejones».



FIG. 4. Dorso o Pavimento empedrado en la Sierra de Navalmanzano, con una cubierta de clastos de escasa densidad.



FIG. 5. Formaciones turrículadas (Bosque de torres) en Sierra de Navalmanzano.



FIG. 6. Formaciones turrículadas (Detalle) en Sierra de Navalmanzano.



FIG. 7. Columnas en forma de torre con formas de animales en la Sierra de Dormideros.



FIG. 8. Columnas con formas de animales y niveles de endurecimiento o concreciones. Sierra de Dormideros.

además en ciertos casos, estos estratos o sus fragmentos están ligeramente levantados, formándose un pequeño caos en la disposición habitual, lo que hace pensar en la intervención del hielo, al menos en este último proceso. Para el origen del agrietamiento en rocas areniscas se han indicado fenómenos de hidratación-deseccación (YOUNG & YOUNG, 1992; SANZ PÉREZ, 1996).

B. Dorsos con perfil redondeado

Aparecen allí donde los procesos erosivos se han acentuado o los estratos se encuentran ya muy desdibujados, de modo que prácticamente llega a desaparecer la fisonomía tableada de roca estratificada y en su lugar se observa una morfología redondeada que recuerda con matices a algunos berrocales graníticos, aunque partiendo en muchos casos de la directriz propia del buzamiento de los estratos. Así pues, estos dorsos se pueden considerar en un grado de degradación mayor que los anteriores. En éstos se integran algunas de las formas de dimensiones medias y fisonomías, también redondeadas, que se explicarán después.

C. Formaciones turriculadas

En los dorsos o en los restos de ciertos frentes rocosos ya muy desgajados, en los que la potencia de los bancos es relativamente notable (varios metros), pueden quedar en resalte ciertos elementos rocosos verticales (4-6 m) que destacan de los pasillos que se han ensanchado considerablemente. Estos elementos se configuran como torres aisladas o a veces como «bosques de torres» que guardan semejanzas fisonómicas con las «ciudades encantadas» del relieve kárstico. Es posible que en estos casos las diaclasas verticales hayan jugado un papel más relevante. Las culminaciones de estas torres se encuentran inclinadas en el sentido del buzamiento de los dorsos y algunos de los pasillos que las enmarcan se hallan muy meteorizados, edafizados y colonizados por la vegetación. En la Sierra de Navalmanzano se sitúa uno de los mejores ejemplos de los que hasta ahora hemos visto.

2. FORMAS MEDIAS

Se localizan en el interior de los dorsos o en relación directa con ellos, una vez que los procesos erosivos han ido excavando y degradando las superficies de los estratos. Entre ellas se han distinguido:

A. Callejones

Son conjuntos de incisiones de escala variable, con profundidades métricas (2-3 m) y anchuras generalmente en torno a 1 ó 2 m. En los casos más destacados se organizan de modo muy similar a los macrolapiaces originados sobre rocas calizas, cuya superficie superior es el propio dorso. En este tipo casi todo el conjunto se articula sobre la superficie rocosa cuarcítica, a diferencia de lo que ocurre en las formaciones turriculadas, como se acaba de explicar, debido a que en los callejones, de menores dimensiones, todavía no se ha «eliminado» o alterado el paquete o estrato correspondiente de la cuarcita. En la cumbre de la Sierra de Dormideros (1.328 m) se puede observar uno de los mejores ejemplos de estos callejones.

B. Columnas en forma de torre

Dentro de los callejones aparecen ciertas formas, que quedan más en resalte, casi siempre cercanas a la terminación del dorso en su parte culminante. Se trata de pequeñas columnas (0,5-2 m), pináculos con aristas erizadas, terminadas en punta, con fisonomías caprichosas que recuerdan a diversas formas de animales. En ciertas líneas o planos se forman algo así como niveles de endurecimiento a modo de costras muy delgadas, como si el agua hubiera arrastrado parte de la sílice lavada más arriba y hubiera precipitado allí.

C. Columnas redondeadas

En ciertos casos se ven formas que se parecen a los bolos de granito e incluso en ciertos puntos se pueden llegar a ver elementos parecidos a las piedras caballeras. Se trata de columnas de tamaño métrico, generalmente. Al igual que pasa con el modelado granítico las diaclasas y fracturas verticales, junto con los planos de estratificación en este caso, serían fundamentales para la penetración del agua en estos conjuntos rocosos.

3. FORMAS MENORES

A estas formas les cuadra perfectamente el término de micromodelados, pues no suelen sobrepasar el metro de anchura. Son muy frecuentes, como ocurría con las anteriores, en los dorsos pero dado su tamaño se pueden encontrar en casi cualquier afloramiento del roquedo cuarcítico. Dentro de ellas se diferencian:



Fig. 9. Columnas redondeadas en «la Atalaya» (Ciudad Real).

A. Acanaladuras

Estos surcos son formas muy extendidas y recuerdan a auténticos lapiaces que rasgan el roquedo a favor de la pendiente y de la esorrentía, la cual parece claramente el agente causante de su modelado. Tienen dimensiones centimétricas en cuanto a profundidad y anchura y, al igual que sucedía con los callejones, se organizan en conjuntos que dejan entre sí resaltes semejantes a setas, voladizos, yunques o microcornisas.

B. Cavidades

Tienen también dimensiones centimétricas (5-20 ó 30 cm) y son bastante frecuentes. En general son más anchas que profundas y tienen una gran analogía morfológica con los pilancones o gnammas típicas de los modelados graníticos y presentes también sobre areniscas (GUTIÉRREZ ELORZA, 2001; SANCHO MARCÉN, 1996;

SANZ PÉREZ, 1994 y 1996), aunque en algunos casos se parecen a las marmitas de gigante de los lechos fluviales. En todo caso la mayoría responderían a las gnammas tipo pan o en cubeta (GUTIÉRREZ ELORZA, 2001). El agua de lluvia suele conservarse en estas cavidades durante largos períodos en épocas de escasa evaporación, observándose también restos de materiales finos y musgos, líquenes, etc. Estos modelados se pueden ver en la Sierra de Puerto Viejo, en la Sierra de las Majadas, etc, aunque son las microformas más abundantes y fáciles de observar en el conjunto del territorio estudiado.

C. Planos de descamación en superficies rocosas o bloques caídos

Se encuentran en afloramientos de cuarcita in situ o bloques cuarcíticos desprendidos y en relación con ellos se produce el despegue de placas bastante arenizadas de espesor centimétrico.

D. Nidos de abeja

Se encuentran en bloques sueltos y no son muy frecuentes. Se trata de agujeros muy numerosos de unos pocos milímetros o de algún centímetro de ancho. En la morfología granítica, donde son prototípicos, BIROT (1981) los ha relacionado con las diaclasas y los puntos en los que el cemento silíceo es menos resistente y señala que se encuentra en el límite de los fenómenos pseudokársticos.

4. FORMAS DE ACUMULACIÓN: LOS ARENALES DE LAS CUMBRES

Son recubrimientos de arena procedentes de la desgregación de las cuarcitas que se encuentran en algunas áreas culminantes de los relieves apalachenses. Las más notables son las acumulaciones de arena existentes en las crestas rocosas de ciertas partes de Sierra Madrona; en concreto, las de mayor entidad las hemos encontrado en la Sierra de Navalmanzano en torno a 1.310-1.320 m, justo debajo de la cumbre, protegidas en ciertos pasillos. Son auténticos arenales aunque de pequeñas dimensiones, de superficie hectométrica y de escaso espesor. Se encuentran cobijados entre paquetes de estratos en dorso, pues de otra forma hubieran sido barridos seguramente dada su posición culminante y su extraordinaria deleznablez. Su presencia nos lleva a pensar también que esta arenización se sigue produciendo en la actuali-



Fig. 10. (arriba) Acanaladuras o pseudolapiaces en la Sierra de Navalmanzano.

FIG. 11. (abajo) Cavidades circulares de pequeño tamaño en la Sierra de Navalmanzano.



FIG. 12. «Nidos de abeja» en un bloque suelto de ladera en la Umbría de Dormideros.

dad o es muy reciente, pues en caso contrario estos arenales habrían desaparecido. Además en su ámbito son muchos los cantos o bloques que se desagregan al tacto y las superficies rocosas (dorsos de estratos generalmente) donde se observan finas películas de arena o granos de arena sueltos procedente de las propias rocas.

V PROCESOS Y MECANISMOS

Aunque en principio las cuarcitas son muy poco permeables, los roquedos que constituyen presentan una red muy densa de discontinuidades estructurales: básicamente planos de estratificación y fracturas mayores, muchas de ellas perpendiculares a aquéllos, y finalmente múltiples diaclasas, que fragmentan la masa ro-

cosa compacta en conjuntos de paralelepípedos. Esta red de planos de discontinuidad posibilitan una permeabilidad relativamente alta en este contexto y a esta escala y a través de ella pueden penetrar las aguas de meteorización, sobre todo en afloramientos de escasa pendiente. Así, las mayores diferencias por lo que se refiere al desarrollo de modelados de detalle como los descritos se observan entre los dorsos y los frentes de las crestas cuarcíticas. Los dorsos, que son mucho más amplios que los frentes, muestran los mejores ejemplos de dichos modelados y dentro de ellos los callejones y las cavidades o pilancones se encuentran en áreas donde la pendiente se hace localmente más suave y se ha podido retener mejor el agua. Las acanaladuras se ven igualmente en áreas de pendientes moderadas, por donde ha podido igualmente circular el agua, pero sin que se produzca una escorrentía instantánea, como sí puede

ocurrir en las paredes de los frentes, casi verticalizados. Éstos, por su parte, manifiestan mucha menor frecuencia de los modelados, muy probablemente porque la circulación del agua es menos duradera en ellos y por la mayor meteorización mecánica y las acciones gravitatorias que los afectan, de las que se deriva su pendiente escarpada y su mayor inestabilidad cuyas acciones habrían desmantelado los modelados de detalle descritos, que sí se conservan con cierta profusión en los correspondientes dorsos.

Por lo que se refiere a los procesos que permitan explicar estos modelados hay que destacar los de meteorización química y concretamente la disolución. Ésta, como se sabe, es un proceso muy relevante en las rocas calizas, pero también puede afectar a las areniscas (MAINGUET, 1972; YOUNG & YOUNG, 1992; SANCHO MARCÉN, 1996) o a las propias cuarcitas (GALÁN, 1991; DOERR, 1999; MARTÍNEZ, 2002). Efectivamente, a pesar de la gran resistencia de las rocas cuarcíticas, la sílice puede ser disuelta por el agua en ciertas condiciones. Algunos autores han explicado que ese proceso ocurre cuando el pH alcanza valores altos, superiores a 7,5-8 (SANCHO MARCÉN, 1996; GUTIÉRREZ ELORZA, 2001) y que esta solubilidad del cuarzo crece muy deprisa a medida que aumenta el pH. Los citados autores, que han estudiado numerosos ejemplos de areniscas en la Cordillera Ibérica y Depresión del Ebro, señalan, apoyándose en los estudios de Loughnan (1969), que sobre todo el cuarzo amorfo se puede disolver y que esta sílice puede ser posteriormente lixiviada.

Por su parte, Eraso Romero y Taylor de Lima (1990) reconocen que la solubilidad de la sílice es un problema no completamente resuelto pero que la disolución de este mineral, así como la precipitación posterior, está perfectamente atestiguada. Esta solubilidad, que a 25 °C y para pH inferiores a 8 es de 6 mg/l, aumenta con la temperatura y se vincula en el caso estudiado por ellos a procesos de gran antigüedad.

Finalmente otros autores, aunque mantengan diferencias en cómo operan los procesos de karstificación en sentido estricto (formas endokársticas y drenaje subterráneo) en las cuarcitas (GALÁN, 1991; DOERR, 1999), no encuentran ningún problema al señalar que la disolución de éstas, aunque es un proceso mucho más lento que la de las calizas, es evidente. Para Doerr (1999), que incluso señala que no sólo se disuelve el cuarzo amorfo sino también los propios granos de cuarzo cristalino, los factores más destacados que favorecen dicha disolución son: la exposición de estos roquedos a la meteorización

química y la estabilidad de estos territorios durante largos períodos de tiempo (decenas de millones de años), la ausencia de otros procesos geomorfológicos que pudieran interferir con éstos y las intensas precipitaciones; concluyendo que en realidad ninguna roca es insoluble. Galán (1991), que ha realizado numerosos trabajos sobre las formas de disolución tanto en rocas calizas como cuarcíticas, también concede gran importancia a la exposición en relieves topográficamente destacados y de morfología tabular, al factor tiempo y a la importante presencia de agua como agentes esenciales para la elaboración de estos modelados sobre materiales silíceos. Y, lo mismo que otros investigadores, considera que la karstificación en cuarcitas es más lenta que en calizas y que la apertura de cavernas en éstas puede precisar varios millones de años o incluso decenas de millones de años.

Por lo que respecta a los procesos mecánicos, han podido contribuir también al modelado de las formas de detalle y de las microformas estudiadas, pero sus repercusiones parecen ser más modestas. Procesos como la gelifración, la hidratación-deseccación e incluso la termoclastia pueden haber ocasionado descamación, agrietamiento, etc y favorecer así el trabajo de los procesos químicos de disolución. Todo indica que son éstos los más eficaces para generar, organizar y dar su forma final al conjunto de modelados que se reconocen sobre las cuarcitas que coronan los relieves montañosos de la Meseta Sur y de Sierra Morena oriental.

VI CONCLUSIÓN

A pesar de su extraordinaria dureza estos roquedos silíceos presentan, pues, las huellas de una meteorización que ha dejado unos testimonios modestos pero evidentes. Se trata básicamente de formas erosivas (aunque también hay arenales) que, guiadas por la trama estructural, organizan un modelado que podemos denominar «pseudokárstico». Efectivamente es el agua el principal agente erosivo y la disolución y arenización de las cuarcitas los procesos fundamentales. Además también hemos observado formas que parecen explicables por la posterior precipitación de la sílice. Por lo que respecta a otras formas consideradas como típicas del karst, como cuevas o cañones (que no hemos estudiado propiamente en este trabajo), hay que señalar que lo más habitual en este caso es encontrar por un lado abrigos muy poco profundos que no parecen mantener un drenaje subterráneo auténtico, sino en todo caso una escorrentía débil y



FIG. 13. Bloque de pedriza en la Sierra de las Majadas (Piedrabuena). La cavidad se asemeja a las marmitas de gigante de los lechos fluviales.



FIG. 14. Clasto de pedriza con una gran redondez. Sierra de Navalmanzano.



FIG. 15. Arenal de la cumbre de la Sierra de Navalmanzano.



FIG. 16. Bloque de pedriza con un apéndice en forma de tubo. Sierra Madrona.

esporádica. Aunque hay algunos valles fluviales con ciertas analogías en las formas con los cañones, como el curso alto del río Tablillas en la sierra de la Umbría de Alcudia, parece que dichas analogías se deben a causas estructurales (configuración local del plegamiento de las propias cuarcitas armóricas).

Como factores del propio medio en el que se desarrollan estos modelados y favorecen su aparición pensamos que hay que destacar, por un lado, la mayor exposición del material cuarcítico a los agentes atmosféricos en las crestas y altas laderas serranas y los escasos desniveles dentro de las propias áreas somitales, que frenarían una rápida escorrenfía y mantendrían el agua más tiempo. De ahí que en los dorsos (mayor superficie rocosa y menor pendiente), en los que se retiene mejor el

agua, es donde se observan las formas más nítidas, tanto las erosivas como los arenales. Por otro lado, la estabilidad geomorfológica (ausencia de otros procesos morfogenéticos que pudieran interferir), como han señalado algunos de los autores citados, también puede ser un factor importante e igualmente la duración en el tiempo de todas estas condiciones ambientales.

Por lo que respecta al desarrollo de los procesos y a su datación, se pueden interpretar en varias fases o conjuntos de fases mayores: una primera de meteorización química o disolución más intensa, una segunda de lavado de los productos alterados, e incluso una tercera de precipitación de la sílice. Se formarían así por un lado, los modelados erosivos propiamente dichos y, por otro, los arenales y las concreciones de sílice. Aunque en rea-

lidad también pueden unos y otros desarrollarse de forma relativamente simultánea, teniendo en cuenta que el vehículo esencial para todos estos procesos es el agua y que ésta puede operar en diferentes condiciones y climas. En todo caso las condiciones del clima actual, con una aridez importante, no parecen ser tan favorables como las de etapas anteriores: hemos encontrado clastos arenizados y «rajados» tanto en pedrizas, como en coluviones y rañas, lo cual parece indicar que ya estaban afectados por estos procesos cuando se fragmentaron y se depositaron como tales desde el Plioceno final-Cuaternario, que es cuando se datan estas formaciones en otros lugares. Sin embargo, cada vez más nos inclinamos por pensar en un mantenimiento actual de los procesos causantes de estos modelados, ya que tanto ciertas formas erosivas como los arenales como el empedrado de los dorsos o pavimentos y otras formas menores presentan el aspecto de ser muy recientes y nos hacen creer que algunos de estos fenómenos pueden seguirse produciendo, aunque más amortiguados, en la actualidad. De ahí que seamos de la opinión de que lo que varía es la intensidad y eficacia con la que han actuado y actúan estos procesos de alteración y disolución: en un clima más cálido y lluvioso que el actual parece lógica una mayor operatividad de los mismos y un mayor desarrollo de las formas de modelado resultantes.

Se reconoce así que las fases de meteorización química, cuyas huellas son evidentes en las litologías graníticas y pizarrosas y que han sido ampliamente estudia-

das en territorios cercanos, han podido afectar también a las cuarcitas de las culminaciones serranas del área de estudio. Nosotros mismos en un trabajo anterior (GARCÍA RAYEGO y MUÑOZ JIMÉNEZ, 2000) hemos relacionado el «coluviión» empastado que recubre las laderas de las sierras apalachenses, cuya fracción gruesa incorpora areniscas y cuarcitas ordovícicas, con el manto de alteración generado durante dichas fases.

Es de resaltar, finalmente, la influencia que puede tener la constatación de que los roquedos cuarcíticos —presuntamente inmunes a ellas— también fueron afectados por la alteración y la disolución sobre las interpretaciones de formaciones geomorfológicas recientes tales como rañas, coluviones e incluso de algunos tipos de pedrizas, que pueden haberse formado «in situ», sin apenas desplazamiento. Es muy posible que en el origen de los clastos de estas formaciones intervengan parcialmente al menos, como ya hemos señalado para los coluviones (GARCÍA RAYEGO y MUÑOZ JIMÉNEZ, 2000), los procesos de alteración o disolución que en este trabajo se han explicado. Estas ideas aplicadas a las rañas conduciría a interpretarlas básicamente como el resultado del derrame por los piedemontes de los materiales acumulados en las laderas ya disgregados y alterados previamente en fases anteriores. A su vez, las laderas seguirían siendo alimentadas por nuevos clastos tanto desde el roquedo infrayacente meteorizado como desde las cumbres sometidas, a procesos de disolución y gelifracción.

Quiero expresar mi gratitud al profesor Julio Muñoz Jiménez por haberme animado a elaborar este trabajo y por sus valiosos consejos y sugerencias.

B I B L I O G R A F Í A

AGUILAR TOMÁS, M. J., BABIANO GONZÁLEZ, F., CULLANT SÁENZ DE SICILIA, J. L. *et al.* (1987): *Mapa geológico de España. E. 1:50.000, Hoja 808. Almadén*, I.G.M.E., Madrid.

BIROT, P. (1981): *Les processus d'érosion à la surface des continents*, Masson, Paris.

BOUYX, E. (1970): *Contribution à l'étude des Formations Anteordoviciennes de la Meseta Meridional (Ciudad Real et Badajoz)*, Memorias del I.G.M.E., Madrid.

COMBA, J. A. (coord.) (1983): *Libro jubilar J. M. Ríos. Geología de España*, I.G.M.E., Madrid.

DOERR, S. H. (1999): «Karst-like landforms and hidrology in quartzites of the Venezuelan Guyana shield: Pseudokarst or "real" karst?», *Zeitschrift für Geomorphologie*, 43 (1), págs. 1-17.

ERASO ROMERO, A. y TAYLOR DE LIMA, M. (1990): «El karst en cuarcitas del Grupo Italocomi Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil: Aplicación del método de Predicción de drenaje

- subterráneo», *Boletín Geológico y Minero*, 101 (2), págs. 277-281.
- FERNÁNDEZ CARRASCO, J., MARTÍNEZ RIUS, A., MOLINA CÁMARA, J. M. *et al.* (1987): *Mapa geológico de España. E. 1:50.000, Hoja 782. Valdemanco del Esteras*, I.G.M.E., Madrid.
- GALÁN, M. (1991): «Disolución y génesis del karst en rocas carbonáticas y rocas silíceas: un estudio comparado», *Munibe*, 43, págs. 43-72.
- GARCÍA RAYEGO, J. L. (1988): «El relieve estructural del Macizo de Valronquillo (Comarca de Montes-Campo de Calatrava)», *Cuad. de Estudios Manchegos*, 18, págs. 405-453.
- GARCÍA RAYEGO, J. L. (1994): *Mapa geomorfológico de la Comarca de Los Montes - Campo de Calatrava*, Serv. de Publicaciones de la Univ. de Castilla-La Mancha, Cuenca.
- GARCÍA RAYEGO, J. L. (1995): *El medio natural en Los Montes de Ciudad Real y El Campo de Calatrava*, Diput. Provincial. B.A.M., Ciudad Real.
- GARCÍA RAYEGO, J. L. (1997): «El medio físico de los Montes», en: *Elementos del medio natural en la provincia de Ciudad Real* (García Rayego, J. L. y González Cárdenas, E., coord.), Servicio de Publicaciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca, págs. 23-81.
- GARCÍA RAYEGO, J. L. y MUÑOZ JIMÉNEZ, J. (2000): «Los caracteres y el ámbito de la morfogénesis fría cuaternaria en las montañas silíceas del interior de La Meseta Sur y de Sierra Morena Oriental: Aproximación a partir de las formaciones de ladera», en: *Procesos y formas periglaciares en la montaña mediterránea* (Peña Monné, J. L. *et al.* Eds.), Inst. de Est. Turolenses, Teruel, págs. 265-280.
- GUTIÉRREZ ELORZA, M. (2001): *Geomorfología climática*, Omega, Barcelona.
- MAINGUET, M. (1972): *Le modelé des grès. Problèmes généraux*, Institut Géographique National, Paris.
- MARTÍN-SERRANO, A. (1991): «El relieve del Macizo Hespérico y sus sedimentos asociados», en: *Alteraciones y paleoalteraciones en la morfología del oeste peninsular* (Blanco, J. A., Molina, E. y Martín-Serrano, A., coord.), I.T.G.E. y S.E.G., Salamanca, págs. 9-26.
- MARTÍN-SERRANO, A. y MOLINA, E. (1989): «Montes de Toledo y Extremadura», en *Mapa del Cuaternario de España* (Pérez González, A., Cabra Gil, P. y Martín-Serrano, A., Eds.), I.T.G.E., Madrid, págs. 187-200.
- MARTÍNEZ, G. A. (2002): «El origen de las cuevas y aleros del sistema serrano de Tandilla», *IV Jornadas de Sociedades Indígenas Pampeanas*, Universidad Nacional del Mar del Plata, Facultad de Humanidades, págs. 3-5.
- MIRA LÓPEZ, M., ORTEGA GIRONES, E. y RODRÍGUEZ PEVIDA, L. S. (1986): *Mapa geológico de España. E. 1:50.000, Hoja 834, San Benito*, I.G.M.E., Madrid.
- MOLINA BALLESTEROS, E. (1991): *Geomorfología y Geoquímica del paisaje*, Edic. Univ. de Salamanca, Salamanca.
- MUÑOZ JIMÉNEZ, J. (1976): *Los Montes de Toledo. Estudio de Geografía Física*, Dpto. de Geografía e Inst. Elcano (C.S.I.C.), Oviedo.
- PALERO FERNÁNDEZ, F. J. (1992): «La sucesión paleozoica y estructura del sinclinal de Solana del Pino (Ciudad Real)», *Estudios Geológicos*, 48, págs. 341-352.
- PALERO FERNÁNDEZ, F., DELGADO QUESADA, M., FERNÁNDEZ RUIZ, J. *et al.* (1989-90): *Mapa Geológico de España. E. 1:50.000. Hoja 860. Fuencaliente*, I.T.G.E., Madrid (inédito).
- PINEDA VELASCO, A. *et al.* (1989): *Mapa geológico de España. E. 1:50.000, Hoja 757. Puebla de Don Rodrigo*, I.T.G.E., Madrid.
- PORTERO GARCÍA, J. M., RAMÍREZ MERINO, J. I., ANCOCHEA SOTO, E. *et al.* (1989): *Mapa geológico de España. E. 1:50.000, Hoja 759. Piedrabuena*, I.T.G.E., Madrid.
- ROIZ, J. M. y VEGAS, R. (1980): «Formaciones ordovícicas y anteordovícicas del anticlinal del Tirteafuera (Sur de la provincia de Ciudad Real)», *Studia Geologica Salmanticensis*, 16, págs. 27-36.
- SANCHO MARCÉN, C. (1996): «Procesos y formas de alteración en areniscas», en *Geomorfología de la Sierra de Albarra-cín* (Peña, J. L., Ed.), XI Curso de Geografía Física, Universidad de Verano de Teruel, págs. 89-212.
- SANCHO MARCÉN, C., PEÑA, J. L. *et al.* (2004): «El modelado en areniscas de los Torrollones de Gabarda (Monegros, Huesca)», en *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos* (Peña, J. L., Longares, L. A. y Sánchez, M., Eds.), Universidad de Zaragoza e Instituto Fernando el Católico, Zaragoza, págs. 329-343.
- SANZ PÉREZ, E., (1994): «El micromodelado de las areniscas de Valonsadero (Soria)», en *Geomorfología en España* (Arnáez, J., García Ruiz, J. M. & Gómez Villar, A., Eds.), SEG, Logroño, págs. 91-105.

SANZ PÉREZ, E. (1996): «Alteración y modelado de las areniscas de la facies Purbeck-Weald del noroeste de la Cordillera Ibérica», *Cuaternario y Geomorfología*, 10 (3-4), págs. 47-61.

SELBY, M. J. (1991): *Earth's Changing Surface*, Clarendon Press, Oxford.

TELLO RIPA, B. (1986): «Relieves apalachenses. Macizo de Las Villuercas (Cáceres)», en *Atlas de Geomorfología* (Martínez de Pisón, E. y Tello Ripa, B., coord.), Alianza Editorial, Madrid, págs. 111-125.

TRICART, J. (1977): *Précis de Géomorphologie. T. II. Géomorphologie dynamique générale*, SEDES, Paris.

VEGAS, R. y ROIZ, J. M. (1979): «La continuación hacia el este de las estructuras hercínicas de las regiones Las Villuercas, Guadalupe y Almadén (Zona Luso-Oriental Alcuadiana)», *Tecniterrae*, 28, págs. 6-10.

VERA, J. A. (ed.) (2004): *Geología de España*, SGE-IGME, Madrid.

YOUNG, R. & YOUNG, A. (1992): *Sandstone Landforms*, Springer-Verlag, Berlin.

Recibido: 12 de junio de 2006

Aceptado: 14 de julio de 2006