

Caracterización de depósitos carbonáticos ligados a paleosurgencias en el sector de Batallones-Malcovadeso (Neógeno de la Cuenca de Madrid)

M. Pozo¹, J. Casas^{1, 2}, J. A. Medina¹, J. P. Calvo³, P. G. Silva⁴

RESUMEN

En la zona de canteras de Valdeinfierno, en el sector de Batallones-Malcovadeso, parte centro-meridional de la Cuenca de Madrid, se ha reconocido una serie de depósitos carbonáticos que presentan geometría dómica y estructura interna columnar. Dentro de estos depósitos de carbonato se distinguen dos unidades. La inferior (U2) es mayoritariamente dolomítica y de estructura brechoide, y petrográficamente consiste en dolomicritas con cemento calcítico. La superior (U3) está formada tanto por dolomita como por calcita, y se caracteriza por el desarrollo de morfologías columnares de aspecto travertínico. Petrográficamente, los depósitos de esta unidad consisten en caliza con texturas alveolar y biogénica. Entre las columnas de carbonato se distinguen abundantes masas arcillosas. Hacia la base de estas unidades carbonáticas se sitúa una unidad detrítica (U1), formada por arenas feldespáticas y a su techo se dispone un conjunto lutítico con alguna intercalación carbonática de composición dolomítica (Unidad U4) y, por encima de estas lutitas, un conjunto calizo (Unidad U5). Las arcillas presentes en la unidad U3 tienen una composición (sepiolita > esmectita trioctaédrica ± illita) netamente diferente a las de la unidad U4 (esmectita dioctaédrica > illita ± caolinita). La composición isotópica de los carbonatos de las unidades U2 y U3, así como de los niveles carbonatados de la unidad U4, es bastante similar en el caso de la dolomita, con valores $\delta^{13}\text{C}$ que oscilan entre $-6,21$ y $-7,78\text{‰}$ y entre $-3,23$ y $-4,05\text{‰}$ para el $\delta^{18}\text{O}$. Por otro lado, desde un punto de vista de su composición isotópica, se diferencian los carbonatos de la unidad 4 y del techo de la unidad 2, exclusivamente calcíticos, en los que los valores de $\delta^{13}\text{C}$ oscilan entre $-8,07$ y $-11,75\text{‰}$, y los de $\delta^{18}\text{O}$ entre $-5,27$ y $-7,35\text{‰}$. La calcita existente en los niveles dolomíticos presenta valores intermedios entre los dos grupos anteriores. Los rasgos de la sucesión sedimentaria y los resultados analíticos obtenidos indican una fase de expansión lacustre en la zona estudiada con un cambio en la química de las aguas, todo ello favorecido por la entrada de aguas subterráneas a través de surgencias.

Palabras clave: Cuenca de Madrid, seepage-mounds, travertinos, análisis isotópico.

ABSTRACT

Carbonate deposits showing domical shape and columnar internal structure have been recognized in the Valdeinfierno quarries (Batallones-Malcovadeso area, central-southern Madrid Basin). Two lithological units (U2 and U3) are differentiated in the carbonates. Unit U2 is mainly brecciated dolomite that consists of dolomicrite with calcite cements. Unit U3 is made up of both calcite and dolomite and is characterized by columnar shapes resembling travertine. Under the microscope, the carbonates consist of limestones with alveolar and biogenic textural features. Abundant clayey masses have been observed within and between the columns. The carbonate units are underlain by a detrital unit (U1) composed of feldspar-rich sandstones. The upper part of the section shows a mudstone unit with local dolomitic carbonate inserts (U4) which is in turn covered by a package of limestone beds (U5). Clays occurring in unit U3 show a different composition (sepiolite > trioctahedral smectite ± illite) than those forming unit U4 (dioctahedral smectite > illite ± kaolinite). Stable isotopic composition of carbonates from units U2, U3 and carbonate inserts of U4 is very similar for dolomite, with $\delta^{13}\text{C}$ values ranging from $-6,21$ to $-7,78\text{‰}$,

¹ Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid. E-mail: manuel.pozo@uam.es.

² Centro de Ciencias Medioambientales CSIC. 28006 Madrid. E-mail: j.casassainzdeaja@uam.es.

³ Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. E-mail: jose.calvo@igme.es.

⁴ Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Escuela Politécnica Superior de Ávila. 05003 Ávila. E-mail: pgsilva@usal.es.

and from $-3,23$ to $-4,05\%$ for $\delta^{18}\text{O}$. Calcite carbonates from units U5 and U2 show $\delta^{13}\text{C}$ values ranging from $-8,07$ to $-11,75\%$, and $\delta^{18}\text{O}$ values from $-5,27$ to $-7,35\%$. Calcite occurring in dolomite beds shows intermediate values between the two groups above mentioned. Both sedimentary features of the carbonate deposits in the studied section and compositional results indicate that the lake environment in which carbonates were deposited underwent changes in the water chemistry that were related to input of groundwater through springs, this resulting in spread-out of the lake water body.

Key words: Madrid Basin, seepage-mounds, travertines, isotopic analysis.

Introducción

La existencia de cuerpos carbonáticos con estructura de montículo (*seepage mounds*) intercalados y deformando depósitos lacustres ha sido reconocida en diferentes sucesiones terciarias peninsulares, tanto en la Cuenca de Madrid como en otras, por ejemplo en la de Las Minas (Hellín, SE español) y en la de Calatayud, interpretándose como resultado de la surgencia de aguas subterráneas en ámbitos lacustres (Calvo *et al.*, 1995a). En la Cuenca de Madrid y dentro del sector comprendido entre el cerro de los Batallones (Torrejón de Velasco) y el de Santa Bárbara (Esquivias), la presencia de estas acumulaciones carbonáticas es relativamente frecuente, quedando expuestas en zonas de cantera para la extracción de arcillas especiales y carbonatos. Sin embargo, hasta la fecha no se habían reconocido evidencias de acumulaciones de carbonatos travertínicos, también relacionadas con la descarga emergente de aguas subterráneas, que dan lugar a espectaculares depósitos de geometría y estructura interna variada similares a las observadas en otros contextos lacustres (ej., Benson *et al.*, 1995). La constatación de la interacción entre surgencia de aguas subterráneas y depósitos previamente formados, dentro de la Unidad Intermedia del Mioceno de la Cuenca de Madrid, es de gran relevancia para la interpretación paleoambiental de las facies resultantes, en especial de las que contienen arcillas magnésicas.

Recientemente y como resultado de los trabajos de campo realizados en el entorno del Cerro de los Batallones, se han identificado acumulaciones de carbonatos con rasgos asimilables a depósitos travertínicos, que se han interpretado como paleosurgencias de aguas subterráneas (Pozo *et al.*, 2005). En este trabajo se presenta un descripción e interpretación de dichos depósitos mediante su caracterización mineralógica, petrográfica y geoquímica, a partir de las observaciones y muestreo de montículos de carbonatos y facies asociadas, en una sección litológica representativa que se dispone estratigráfi-

camente a techo de los depósitos de sepiolita existentes en la zona de Batallones.

Materiales y métodos

La sección estudiada se localiza en el área centro-meridional de la Cuenca de Madrid (fig. 1), en una zona de canteras abandonadas conocida como zona de Valdeinfierno, entre las poblaciones de Valdemoro y Esquivias (sector Batallones-Malcovadeso). En una de estas canteras han quedado expuestos depósitos de carbonatos con geometría de montículo (convexa hacia arriba) y estructura interna en columnas verticales que han causado la deformación de los materiales suprayacentes (fig. 2A). En la columna estratigráfica levantada, denominada VALDE y en la que se han reconocido cinco unidades litológicas, se ha recogido un total de 19 muestras (fig. 3). En todas las unidades distinguidas, especialmente en las unidades 2 y 3, se observa la presencia de pequeñas fallas distensivas (fig. 2B).

El estudio mineralógico de las muestras obtenidas se ha realizado mediante difracción de rayos X, tanto para la muestra total



Fig. 1.—Localización de la zona estudiada en la Unidad Intermedia del Neógeno de la Cuenca de Madrid.

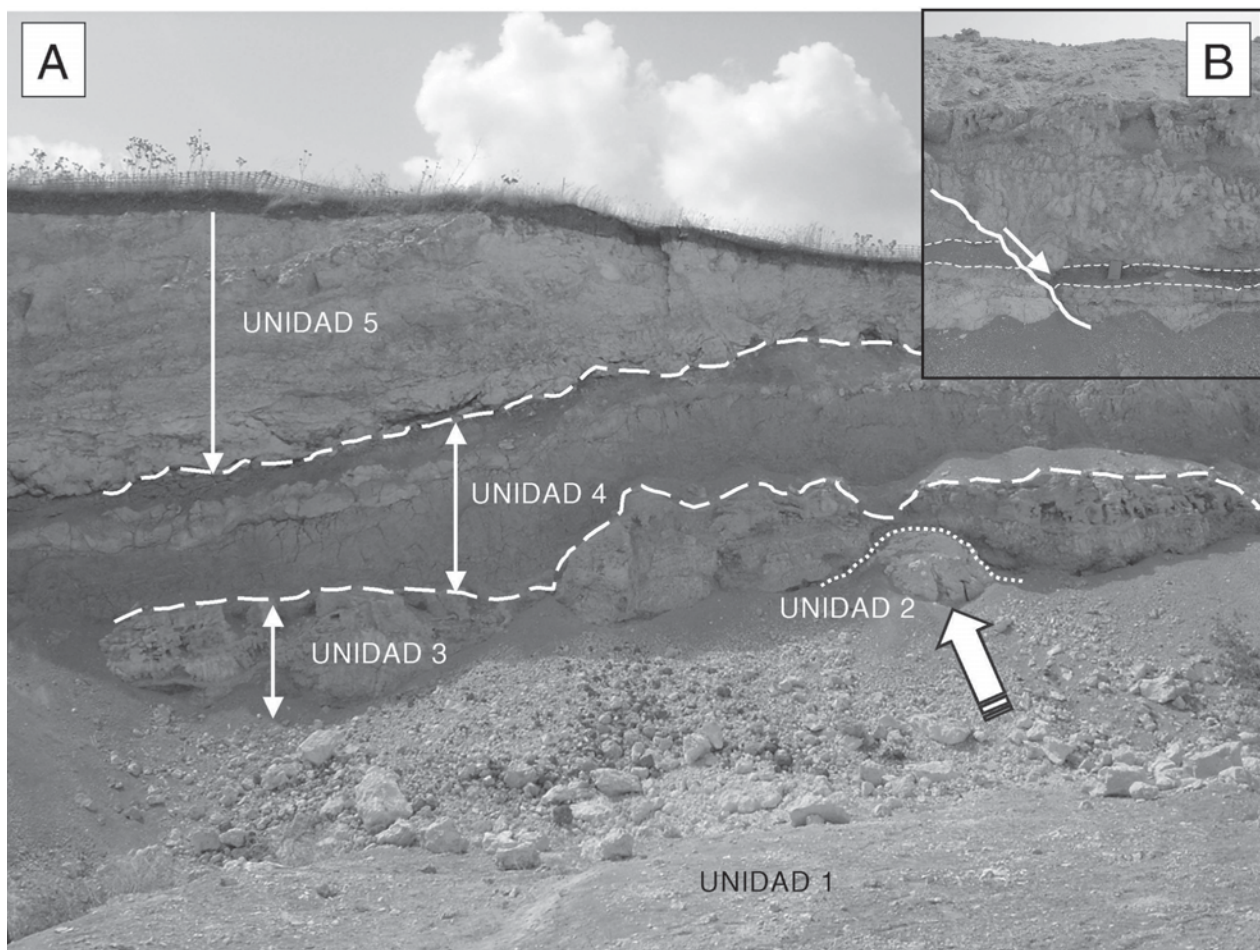


Fig. 2.—Aspecto de la sección estudiada en la zona de canteras de Valdeinfierno. A) Indicación de las cinco unidades litológicas diferenciadas en la sección. La flecha gruesa indica la posición de una de las estructuras en montículo carbonático (*seepage mound*). La longitud del martillo de escala es 33 cm. B) Detalle de una falla distensiva de pequeño salto afectando a los materiales de las unidades U2 y U3; la altura del cuaderno usado de escala es 19 cm.

pulverizada (63 μm) como para la fracción menor de 2 μm , obtenida por dispersión y sedimentación en agua. La caracterización de los constituyentes en la fracción arcilla se ha realizado sobre agregados orientados de muestra homoionizada en Mg^{2+} , solvatada con etilenglicol y tratada térmicamente a 550 $^{\circ}\text{C}$. El examen petrográfico se ha realizado en lámina delgada, teñida con rojo de alizarina S para diferenciar calcita y dolomita. La microfábrica de los carbonatos y las lutitas se ha estudiado mediante microscopio electrónico de barrido (M.E.B.) en superficies frescas, empleando un equipo Philips SEM-500 con sistema analítico EDX. Finalmente, el estudio geoquímico de los carbonatos ha consistido en el análisis de los isótopos estables de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) y oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$), tanto para calcita como para dolomita. En la extracción del CO_2 se ha seguido el procedimiento estándar, empleando H_3PO_4 a 25 $^{\circ}\text{C}$, en las condiciones establecidas por el Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de Salamanca. Los datos se presentan en ‰ referidos al estándar PDB, siendo la precisión analítica del orden de $\pm 0,10\%$ para el carbono y de $\pm 0,15\%$ para el oxígeno.

Resultados

Descripción de litofacies y mineralogía

Unidad U1. Areniscas y limolitas

Los materiales detríticos que forman esta unidad se han observado tan sólo en una cata situada en el fondo de la cantera, lo que permite observar hasta 1 m de espesor de depósito (fig. 3). Se trata de areniscas con intercalaciones de limolitas, que se disponen estratificadas en capas de espesor decimétrico con geometría tabular, sin observarse contactos erosivos entre las diferentes capas detríticas ni estructuras internas de carácter tractivivo. Las areniscas presentan color verde amarillento, con tamaño

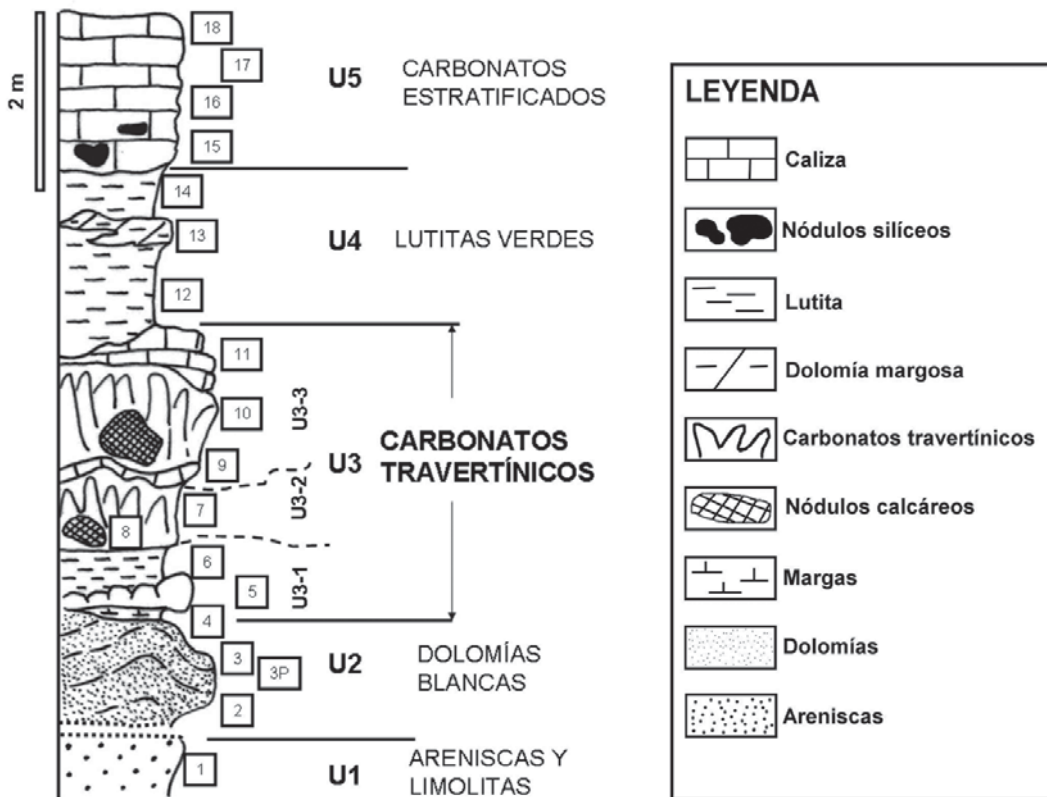


Fig. 3.—Columna litológica de la sección estudiada en la cantera de Valdeinfierno; se indica la posición de las muestras recogidas. Las unidades litológicas coinciden con las mostradas en la figura 2A. Destaca la diferenciación de tres tramos en la unidad de carbonatos travertínicos.

de grano fino, selección moderada a mala y clastos subangulosos a angulosos.

El estudio mineralógico de las areniscas y las limolitas muestra una composición formada casi exclusivamente por feldespatos (plagioclasa > feldespato potásico), con bajo porcentaje de cuarzo e indicios de filosilicatos (tabla 1).

Unidad U2. Dolomías blancas

No ha sido posible observar el contacto de estos materiales con la unidad detrítica infrayacente. Aunque los carbonatos de esta unidad, todos ellos de textura muy fina, no presentan estratificación clara, son frecuentes las estructuras de deformación internas, tanto cóncavas como convexas, resultando en una estructura fuertemente brechificada a través de frecuentes planos curvados. El techo presenta geometría cómica, evidenciando en algunos casos una fuerte presión sobre los depósitos adyacentes (fig. 2A).

Mineralógicamente, los carbonatos de esta unidad están formados por calcita y dolomita, predominando la dolomita en unos casos y la calcita en otros. La dolomita no es estequiométrica (52,4-52,6% CaCO₃) y presenta bajo ordenamiento (fig. 4).

Petrográficamente, la fábrica predominante es la de dolomicrita microbrechificada con abundantes

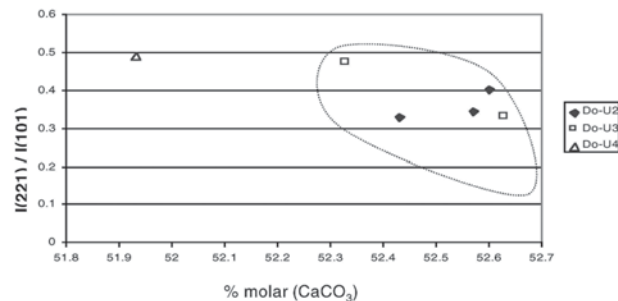


Fig. 4.—Variación de los valores de ordenamiento y quimismo (% de CaCO₃) de la dolomita en las unidades litológicas distinguidas en la sección de Valdeinfierno.

Tabla 1.—Composición mineralógica de las muestras tomadas en la sección de Valdeinfierno; la tabla incluye datos de composición del total de la muestra y de la relación porcentual de minerales de la arcilla (%)

Muestra	Fracción total					Fracción arcilla (< 2 µm)				
	Filosilicatos	Cuarzo	Feldespatos	Calcita	Dolomita	Esmectita	Illita	Sepiolita	Palygorskita	Caolinita
Valde-1	1	5	94	0	0					
Valde-2	0	1	1	70	28					
Valde-3	0	0	0	31	69					
Valde-3P	0	1	0	71	28					
Valde-4	43	6	0	51	0	28	11	61	0	0
Valde-5	1	1	0	98	0					
Valde-6	100	0	0	0	0	28	28	44	0	0
Valde-7	11	0	0	4	85	35	10	55	0	0
Valde-8	15	4	0	53	28	39	6	49	6	0
Valde-9	0	0	0	100	0					
Valde-10	11	0	0	89	0	90	10			
Valde-11	13	1	0	86	0					
Valde-12	98	2	0	0	0	65	33	0	0	2
Valde-13	21	4	0	30	45	67	33	0	0	0
Valde-14	98	2	0	0	0	81	19	0	0	0
Valde-15	0	1	0	99	0					
Valde-16	22	2	0	76	0					
Valde-17	16	1	0	83	0	0	0	0	100	0
Valde-18	5	2	0	93	0					

texturas de calcitización. La calcita aparece en forma de cementos esparíticos, ocupando grietas dentro de la fábrica de la dolomicrita brechificada y también como material reemplazando a la dolomita. Se han podido observar fábricas que reflejan todos los estadios de este último proceso, desde dolomicrita con escasa cementación de calcita hasta fábricas en que la dolomita queda como relicto entre la calcita (figs. 5A y B). La calcita esparítica rellena tanto planos como poros módicos, por lo que la porosidad de estos carbonatos es usualmente muy baja.

Mediante microscopio electrónico de barrido, se observa que la dolomita se presenta en cristales euhédricos (romboedros) de tamaño inferior a 3 µm, originando algo de porosidad intercrystalina que puede cerrarse parcialmente por minerales fibrosos, posiblemente de sepiolita (fig. 5C). La calcita se presenta tanto en placas aisladas, de tamaño próximo a 30 µm como en agregados de cristales anhedral, con tamaños entre 5 y 10 µm (fig. 5D).

Unidad U3. Carbonatos travertínicos

Se han diferenciado tres tramos dentro de esta unidad (fig. 6). El tramo inferior es lutítico-margoso

con carbonatos intercalados en forma de lentículas. Sobre este tramo, en contacto neto, se disponen dos niveles de carbonatos, ambos de geometría irregular y con estructura interna columnar. En el primero de estos niveles se reconocen morfologías nodulares de tamaño decimétrico con sección esferoidal, aspectos estos que también se observan, aunque con menos nitidez, en el nivel de carbonato superior. El techo de este último es muy irregular, localmente con geometría cómica.

El tramo lutítico-margoso inferior de esta unidad (U3-1, en fig. 3) alcanza un espesor máximo de 0,5 m e intercala un nivel carbonático noduloso de techo muy irregular. Por debajo de este nivel se sitúa una delgada capa de marga de color verde-oscuro, algo laminada, que se pierde lateralmente, de forma que el carbonato reposa localmente sobre la unidad U2. A pequeña escala, la capa margosa muestra frecuentes superficies de rotura que disgregan el material y le confieren un aspecto clástico. Observada mediante M.E.B., esta marga muestra una fábrica brechoide en la que se reconocen láminas arrugadas de esmectitas mezcladas con placas y cristales de calcita, así como con relictos de cristales muy pequeños de dolomita, localmente con rasgos de disolución (figs. 5E y 5F). Por encima del nivel carbonático se dispone una capa de lutitas ver-

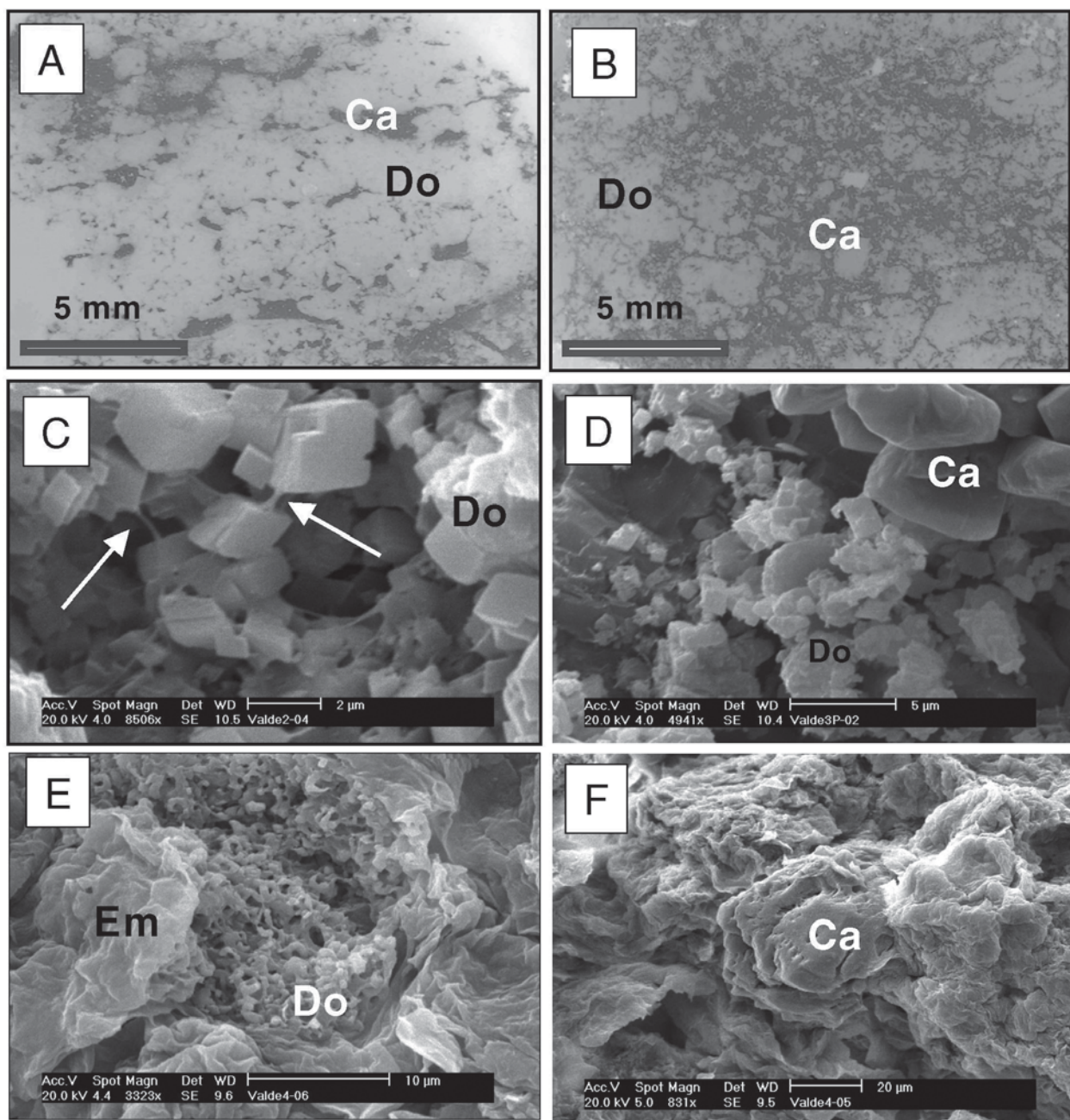


Fig. 5.—Rasgos texturales de los carbonatos presentes en la sección de Valdeinfierno. A) Imagen de una lámina delgada de la muestra VALDE-3 teñida con rojo de alizarina S (en gris más oscuro); se observa el predominio de dolomita (Do) y el incipiente desarrollo de calcita (Ca) rellenando poros. B) Imagen de una lámina delgada de la muestra VALDE-3P, en la que se observa una mayor presencia de calcita (Ca) y el aspecto brechoide de la dolomita (Do). C) Imagen de M.E.B. en la que se observan cristales romboédricos de dolomita (Do) y fibras en poros (flechas). D) Cristales euhédricos de dolomita englobados en una masa de cristales de calcita (Ca). E) Cristales de dolomita (Do) con evidencias de disolución en sus núcleos (cavidades) englobados entre agregados laminares de esmectitas (Em). F) Aspecto de cristales anhedrales de calcita (Ca) incluidos en una matriz arcillosa.

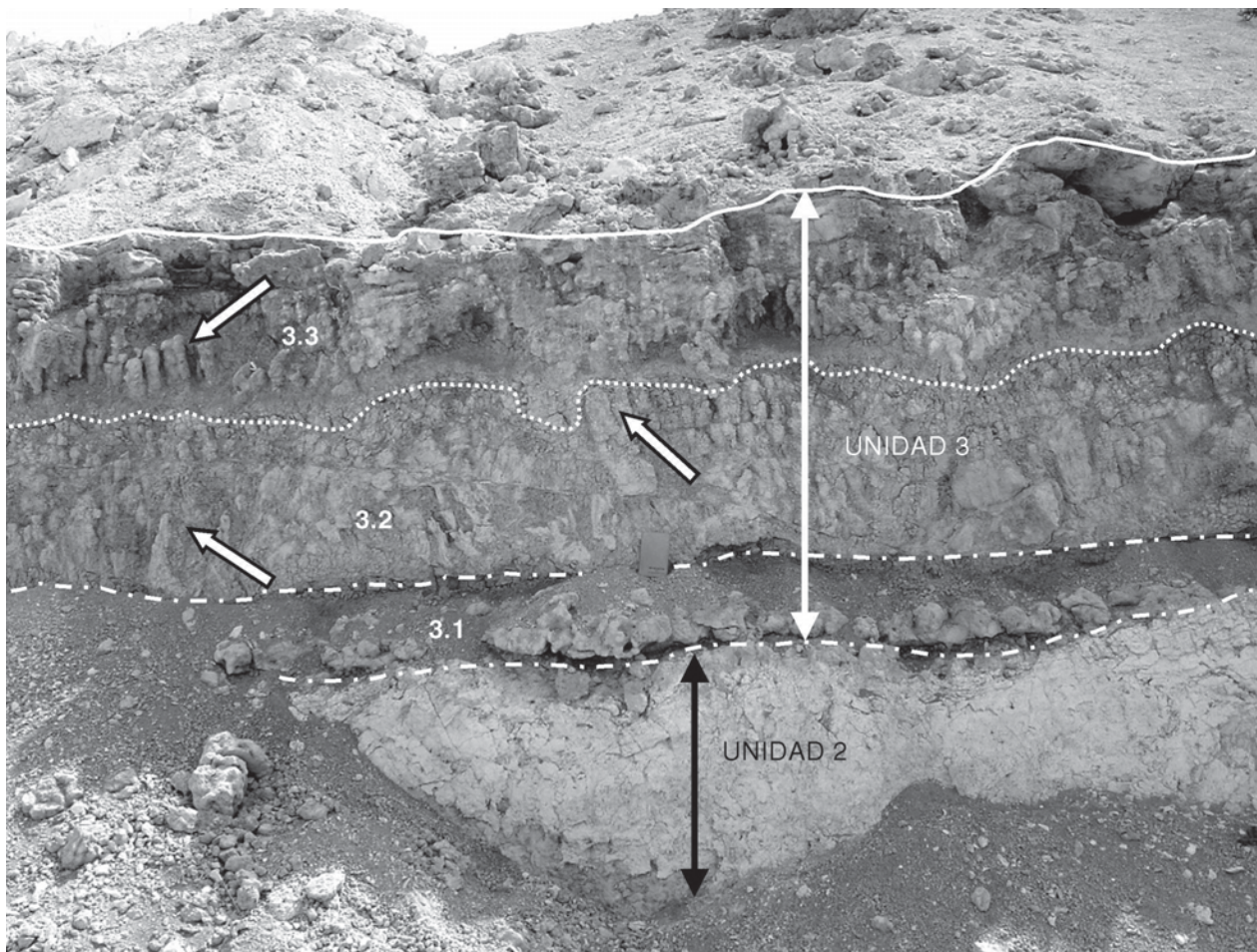


Fig. 6.—Aspecto de campo de las unidades U2 y U3 constituidas por carbonatos dolomíticos y calizas. En los tramos 3.2 y 3.3 destaca el desarrollo de formas columnares (flechas). La libreta en el contacto entre los tramos 3.1 y 3.2 tiene una altura de 19 cm.

dosas, localmente con tonalidades de color crema y textura ccrea y gruesa. Estas lutitas no contienen carbonato, estando formadas esencialmente por esmectitas de baja cristalinidad (índice de Biscaye 0,4), con valores del espaciado $d(060)$ entre 1,51 y 1,52 Å, lo que indica predominio de filosilicatos trioctaédricos. Además, son frecuentes los agregados fibrosos de sepiolita, presentándose tanto con disposición planar en finas películas (fig. 7A) como en agregados densos de aspecto geliforme, con fibras de tamaño inferior a 5 μm .

El nivel de carbonato intercalado es esencialmente calcita y está heterogéneamente cementado. Los cristales de calcita están mal definidos y muestran superficies lisas; localmente engloban relictos de agregados arcillosos laminares y fibrosos (fig. 7B).

El tramo carbonático inferior (U3-2, en fig. 3) tiene una potencia que oscila entre 0,80 y 1 m y

consiste en columnas individuales de hasta 50 cm de altura y masas irregulares de carbonato con material intersticial detrítico de tono oscuro.

Los carbonatos son microcristalinos y de color marrón claro a rosáceo, con compactidad variable debido a fenómenos de cementación diferencial. Se observan poros móldicos con rellenos de agregados vítreos de pequeño tamaño, cristales dispersos de calcita más grandes (1-2 mm) y planos con películas arcillosas de color claro. Dentro de este tramo carbonático se reconocen nódulos de dimensión decimétrica a métrica, con morfología esférica, que afectan a los carbonatos dolomíticos y a las arcillas relictas asociadas. Estos nódulos de carbonato son relativamente compactos y localmente muestran morfologías de «box-work», con tabiques de calcita relleno de grietas y relictos lutíticos en su interior.

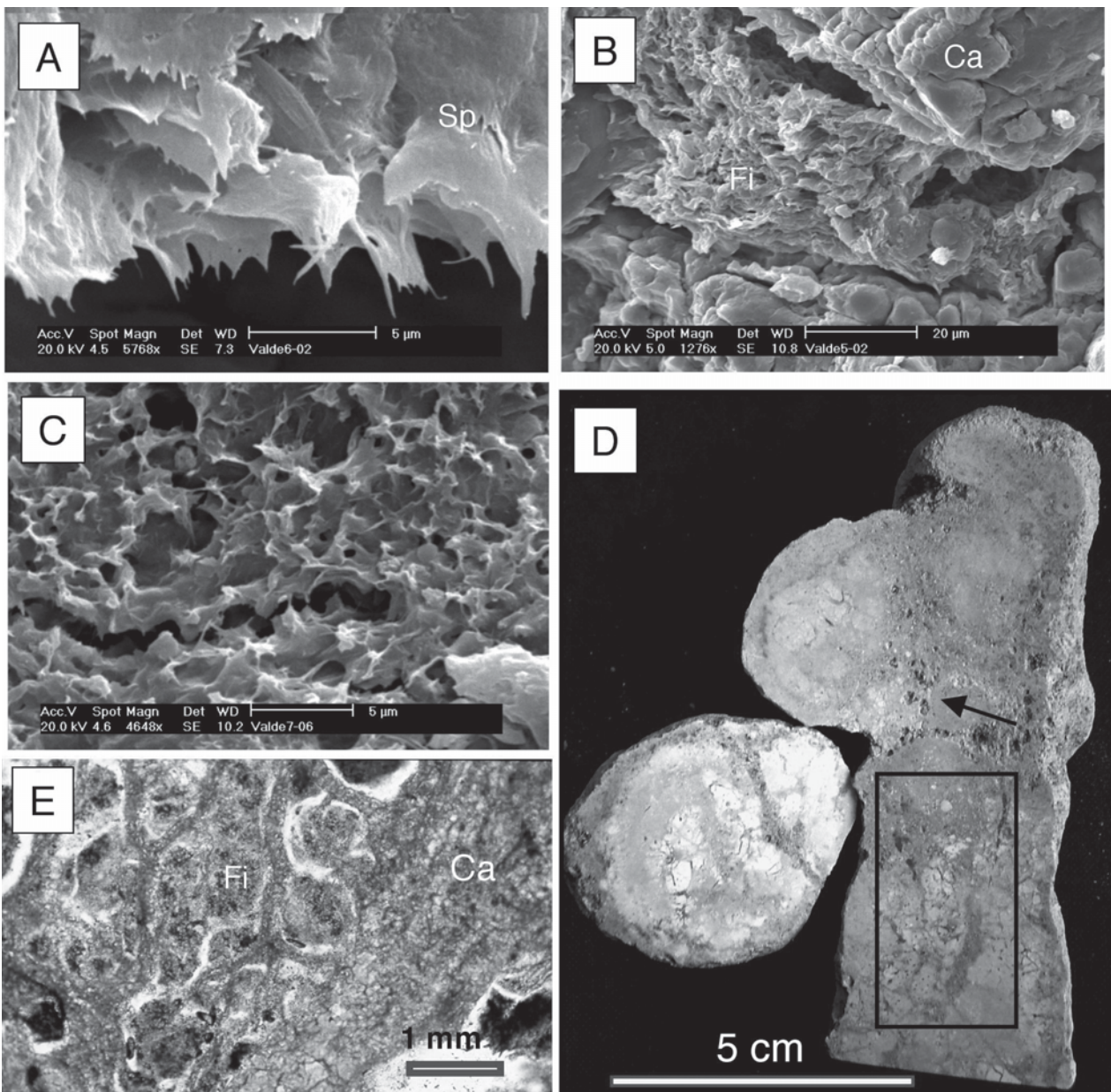


Fig. 7.—Aspectos texturales de algunas de las muestras recogidas en la sección de Valdeinfierno. A) Imagen de M.E.B. en la que se observan láminas de agregados de fibras de sepiolita (Sp). B) Detalle de agregados de minerales de la arcilla (Fi) relictos englobados en una masa de calcita anhidra (Ca). C) Microfábrica porosa en arcilla, dando lugar a huecos de apariencia móldica. D) Sección longitudinal y transversal de una de las estructuras columnares presentes en el tramo U3.3. Destaca la complejidad de la estructura con morfologías clásicas y canales (recuadro), así como la existencia de bandeados y poros (flecha). E) Aspecto petrográfico (luz polarizada con nicóles paralelos) de una de las columnas de carbonato, donde se reconoce la disposición en tabiques ramificados de la calcita esparítica (Ca) y de los agregados arcillosos (Fi) englobados.

En los carbonatos de este tramo predomina la dolomita no estequiométrica (52,3-52,7% de CaCO_3) y con bajo ordenamiento (fig. 4), con calcita y filosilicatos muy subordinados. Por el contrario, los nódulos son fundamentalmente calcíti-

cos, con dolomita y filosilicatos en baja proporción (tabla 1).

El estudio microscópico de los carbonatos del tramo U3.2 muestra mezcla de minerales de la arcilla y de carbonatos. La parte no carbonática está

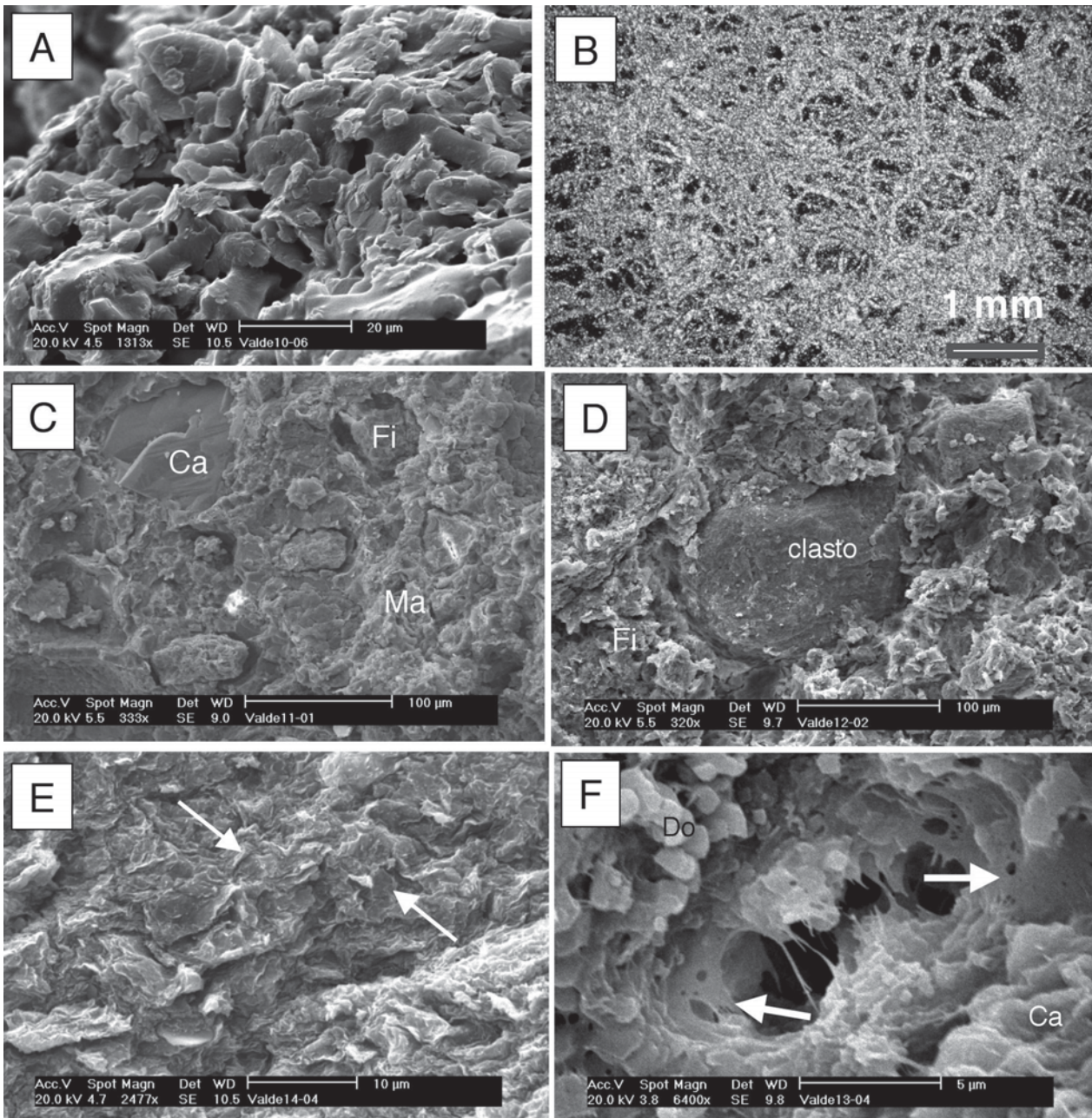


Fig. 8.—Aspectos texturales de los carbonatos de la Unidad U3. A) Imagen de M.E.B. en la que se observa el aspecto clástico de los carbonatos columnares; es de destacar la existencia de geles recubriendo parcialmente los granos de calcita. B) Imagen de lámina delgada (nícoles cruzados) mostrando la textura celular característica de los carbonatos tabulares a techo del tramo U3.3. C) Imagen M.E.B. de la textura clástica de los carbonatos tabulares del techo de la unidad U3 mostrando inclusiones de calcita (Ca) y agregados arcillosos (Fi) englobados en una masa de carbonato (Ma). D) Detalle de clasto lutítico incluido en una masa arcillosa más porosa (Fi). E) Microfábrica laminar de aspecto fluidal (flechas) constituida predominantemente por agregados laminares de esmectita. F) Detalle de cavidad con telas de araña formadas por fibras de sepiolita (flechas) en presencia de cristales euhédricos de dolomita (Do) y anhedral de calcita (Ca).

constituida por filosilicatos arcillosos que dan lugar a microfábricas muy porosas, con aspecto esponjoso (fig. 7C). Son muy frecuentes los agregados de fibras de sepiolita, a veces formando películas que tapizan superficies o cierran poros.

El material fino ligado a los carbonatos presenta una asociación constituida por sepiolita predominante, acompañada de esmectita de baja cristalinidad (índice de Biscaye 0,38) y, en menor proporción, de illita y palygorskita.

El tramo carbonático superior (U3-3 en fig. 3) presenta un espesor variable entre 0,5 y 1,20 m, estando constituido en su base por carbonatos de aspecto clástico que pasan hacia arriba a un agregado de columnas de aspecto travertínico y culmina, localmente, en capas lateralmente irregulares de morfología cómica (fig. 6). El carbonato basal muestra aspecto terroso, no granular, de alta porosidad, sobre el que crecen las morfologías columnares. Estas tienen en general una altura inferior a 0,25 m y presentan escasa porosidad y compacidad. En su interior se reconocen fábricas clásticas angulosas y canales de posible origen biológico (fig. 7D). Petrográficamente, la textura es muy porosa, con abundantes cavidades limitadas por paredes de calcita, a veces con morfologías curvadas y concéntricas, que dejan en su interior masas arcillosas relictas (fig. 7E). En otras partes del depósito carbonático se reconocen entramados que originan una especie de enrejado construida por agregados calcíticos formando fibras. En detalle, el estudio microscópico pone de manifiesto la existencia de mezcla de carbonato clástico (<20µm) con arcilla, mostrando ésta última microfábricas muy porosas. Asimismo destaca la presencia de mosaicos de calcita de mayor tamaño (>50 µm) y de frecuentes recubrimientos de capas geliformes que recubren particularmente al carbonato de menor tamaño (fig. 8A).

En los carbonatos tabulares que localmente forman el techo de la unidad 3, se observa una carbonatación no homogénea, que provoca fenómenos de cementación diferencial. La textura es muy porosa, con tamaños de poro más grandes que en el carbonato columnar, estando la calcita presente tanto en la masa micrítica como en las empalizadas esparíticas que la cortan y que componen, en conjunto, una estructura celular (fig. 8B). La observación mediante M.E.B. confirma estos rasgos, mostrando texturas clásticas (fig. 8C) con placas de calcita y grumos arcillosos. En detalle, la matriz es una mezcla de calcita y de minerales de la arcilla,

predominando en éstos los agregados laminares arrugados de esmectitas.

Unidad U4. Lutitas verdes

Los materiales lutíticos que forman esta unidad se disponen en contacto muy irregular sobre los depósitos carbonáticos de la Unidad 3 (figs. 2 y 4). Consisten en lutitas masivas de color verde oscuro, aunque en el contacto con la unidad carbonática estratificada se observa localmente algún nivel laminado de escasa potencia. Las lutitas masivas, que constituyen la unidad U4, presentan una intercalación carbonatada formada por lentejones con rasgos de deformación (fig. 2A).

Hacia la parte inferior de la unidad, las lutitas presentan aspecto terroso, siendo fácilmente disgregables. Mediante microscopio petrográfico se reconoce la textura clástica de estas lutitas, con componentes individuales de tamaño superior a las 100 µm (fig. 8D). La microfábrica en estos clastos es compacta y poco porosa, contrastando con la de la matriz que la engloba, que se caracteriza por una microfábrica abierta de elevada porosidad.

Las lutitas superiores de la unidad son más compactas y masivas, exhibiendo además un tono verdoso más oscuro. Presentan una microfábrica muy compacta que localmente tiende a laminar con rasgos de fluidificación, englobando granos de cuarzo. Los minerales de la arcilla aparecen como agregados laminares arrugados (fig. 8E).

La intercalación carbonatada es de color claro (amarillento) y de escasa compacidad. La composición de estos carbonatos se caracteriza por un predominio de la dolomita frente a calcita, con filosilicatos subordinados e indicios de cuarzo. La dolomita no es estequiométrica y su ordenamiento es bajo (fig. 4). El estudio microscópico pone de manifiesto la mezcla de dolomita euhédrica de pequeño tamaño (< 3 µm) con calcita anhedral mayor (5-10 µm) y con agregados arcillosos esmectíticos. Destaca la elevada microporosidad y la presencia de algunos cementos formados por agregados fibrosos de sepiolita en tela de araña (fig. 8F).

La fracción arcilla presenta una asociación mineralógica formada por esmectita predominante, con illita subordinada e indicios de caolinita. El índice de Biscaye de la esmectita muestra valores más altos que en las unidades previas, oscilando entre 0,53 y 0,71. En la muestra VALDE-14 (tabla 1), muy rica en esmectita (80%), el valor del espaciado

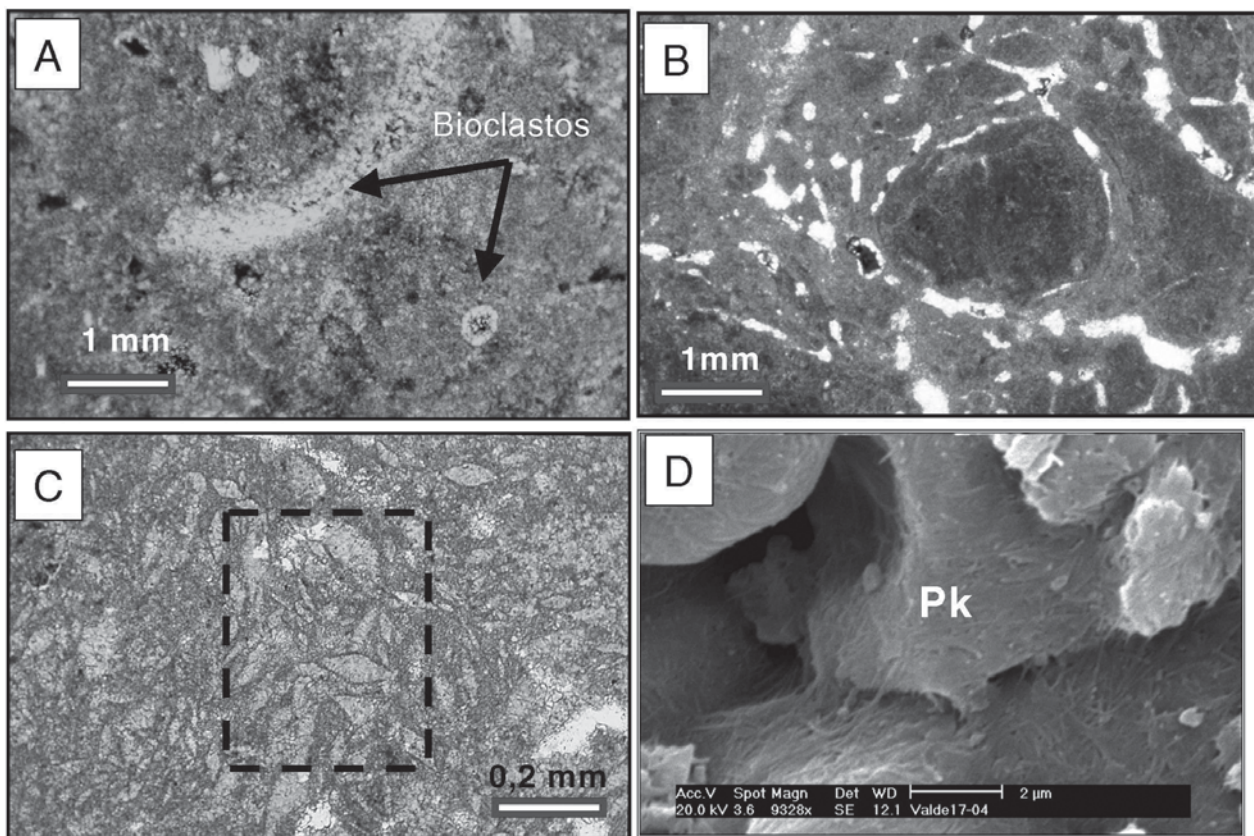


Fig. 9.—Rasgos texturales de los carbonatos de la Unidad U5. A) Biomicrita con restos de bioclastos (luz polarizada con nicoles cruzados). B) Nódulo de micrita densa con poros circungranulares y estructuras alveolares huecas en caliza palustre (luz polarizada con nicoles paralelos). C) Detalle de cristales lenticulares de yeso posteriormente calcitizados (luz polarizada con nicoles cruzados). D) Detalle de agregados fibrosos de palygorskita (Pk) recubriendo superficies de calcita.

d(060) próximo a 1,509 Å sugiere el predominio de términos dioctaédricos.

Unidad U5. Carbonatos estratificados

Constituyen la parte superior de la sección estudiada (figs. 2 y 3). La unidad consiste en capas de caliza de tonos beige a blanco grisáceo, netamente estratificadas, con presencia de nódulos silíceos, especialmente en la base de la unidad (fig. 2A).

Petrográficamente, las calizas presentan dos tipos texturales principales. Así, en la base y techo de la unidad los carbonatos son micritas fosilíferas o biomicritas (fig. 9A), mientras que en los niveles intermedios se han identificado micritas con rasgos palustres, tales como poros circungranulares e intraclastos debidos a procesos de desecación (fig. 9B). En las calizas bioclásticas se reconocen restos de ostrácodos, carofitas y gasterópodos,

además de cristales lenticulares de yeso calcitizado (fig. 9C).

El estudio mineralógico muestra el predominio de calcita en todos los carbonatos, pero en el caso de las calizas con rasgos palustres el contenido en filosilicatos llega a alcanzar el 20%. El análisis de los minerales de la arcilla en uno de estos niveles ha puesto de manifiesto la presencia de palygorskita, que se presenta principalmente recubriendo los granos de carbonato en planos (fig. 9D).

Geoquímica de isótopos estables de los carbonatos

Los resultados obtenidos del análisis isotópico de las muestras carbonáticas se recoge en la tabla 2 y su proyección en la figura 10. El examen de los resultados permite diferenciar claramente dos zonas

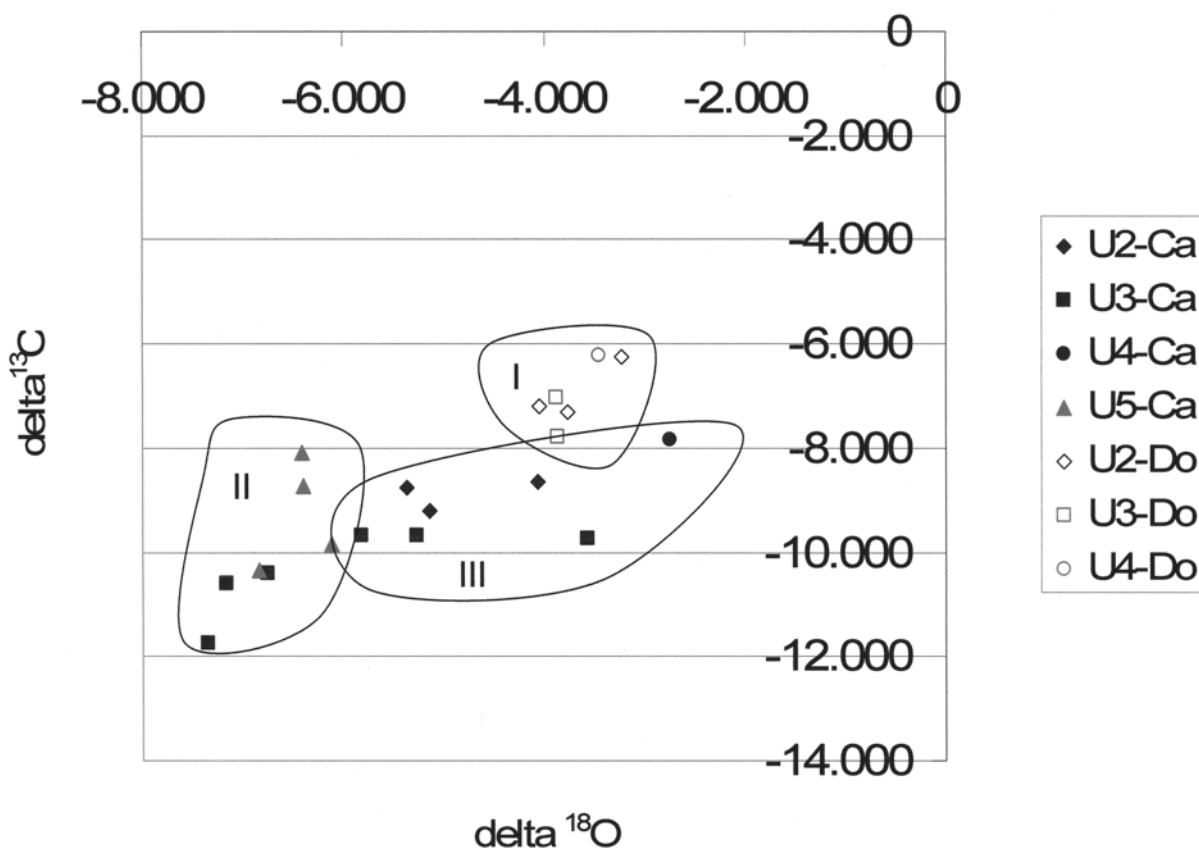


Fig. 10.—Diagrama en el que se muestra la composición en isótopos estables de los carbonatos existentes en la sección de Valdeinfierno. Los campos I y II diferenciados en el diagrama corresponden a muestras de carbonato dolomíticos y calcíticos, respectivamente. El campo III corresponde a la calcita presente en litofacies dolomíticas.

Tabla 2.—Valores de la composición isotópica de calcita y dolomita en las muestras recogidas en la sección de Valdeinfierno. En la columna de la derecha se indican las unidades litológicas diferenciadas dentro de la sección

Muestra	Calcita (‰ vs. PDB)		Dolomita (‰ vs. PDB)		Unidades
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	
Valde-2	-9,196	-5,133	-7,305	-3,766	Unidad U2 (Dolomías blancas)
Valde-3	-8,634	-4,068	-6,260	-3,234	
Valde-3P	-8,769	-5,366	-7,206	-4,054	
Valde-5	-10,590	-7,161			Unidad U3 (Carbonatos travertínicos)
Valde-7	-9,728	-3,572	-7,021	-3,873	
Valde-8	-9,679	-5,814	-7,785	-3,865	
Valde-9	-9,680	-5,270			
Valde-10	-11,750	-7,354			
Valde-11	-10,390	-6,756			
Valde-13	-7,847	-2,741	-6,216	-3,454	Unidad U4 (Lutitas verdes)
Valde-15	-10,350	-6,836			Unidad U5 (Carbonatos estratificados)
Valde-16	-9,831	-6,117			
Valde-17	-8,078	-6,416			
Valde-18	-8,741	-6,406			

que separan los carbonatos dolomíticos (zona I) y las calizas (zona II) (fig. 10). Entre ambos se establece una tercera zona (III) correspondiente a la proyección de la relación isotópica de la calcita en los términos dolomíticos. Los resultados son en parte coincidentes con los resultados obtenidos por Calvo *et al.* (1995b) en el estudio de diversos tipos de carbonatos en la Cuenca de Madrid.

La dolomita analizada en las muestras de carbonatos correspondientes a las unidades U2, U3 y U4 presenta valores de $\delta^{18}\text{O}$ variables, oscilando entre $-3,23$ y $-4,05\text{‰}$; por su parte, la calcita varía entre $-3,57$ y $-5,81\text{‰}$, con el mayor empobrecimiento asociado a los carbonatos donde la calcita predomina sobre la dolomita. En lo que respecta al $\delta^{13}\text{C}$, los valores oscilan entre $-6,21$ y $-7,78\text{‰}$ para la dolomita, y entre $-7,84$ y $-9,72\text{‰}$ para la calcita.

El análisis de los carbonatos exclusivamente calcíticos pone de manifiesto contenidos en $\delta^{18}\text{O}$ que oscilan entre $-5,27$ y $-7,35\text{‰}$, mientras que el $\delta^{13}\text{C}$ varía entre $-8,07$ y $-11,75\text{‰}$.

Los valores más negativos, tanto de $\delta^{18}\text{O}$ como de $\delta^{13}\text{C}$, se han determinado en los carbonatos columnares de composición calcítica de la unidad U3.

Discusión

Los resultados obtenidos indican que en los depósitos sedimentarios estudiados existen dos episodios de acumulación y crecimiento de carbonatos, relacionados con la acción de aguas subterráneas. Esta interpretación se basa en las diferencias observadas en la estructura y composición, tanto mineralógica como isotópica, de estos carbonatos. La morfología de la acumulación formada sería el resultado de la descarga de aguas subterráneas, previsiblemente a través del sistema de fracturas de la zona. Esto podría explicar, además, la deformación (plástica y frágil) que muestran localmente los depósitos sedimentarios en la zona estudiada.

El substrato constituido por areniscas feldespáticas poco cementadas (unidad U1) podría ser la vía de acumulación y conducción de las aguas subterráneas, actuando como un acuífero. El predominio de las plagioclasas y la práctica ausencia de cuarzo en las areniscas es especialmente interesante ya que parece indicar que las aguas en contacto con los clastos arenosos debieron ser fundamentalmente alcalinas (Pozo y Casas, 1997), lo que explicaría la escasa alteración de las plagioclasas y el pobre contenido en cuarzo, que en esas condiciones habría

sufrido una disolución intensa. La presencia de sílice en las aguas justificaría, además, la obtención de las relaciones Si/Mg necesarias para la neoformación de la sepiolita observada en los depósitos estudiados (Pozo y Casas, 1999).

Las dolomías brechoides de la unidad U2 muestran similitudes texturales con los montículos de descarga (*seepage-mounds*) descritos en el sector de Malcovadeso, próximo a la zona de estudio (Calvo *et al.*, 1995a), aunque aquellos son predominantemente calcíticos. Montículos similares, con composición dolomítica, calcítica, o ambas, han sido citados en el Desierto de Amargosa, oeste de Estados Unidos (Hay *et al.*, 1986), donde estos autores observaron la presencia de arcillas magnésicas, especialmente sepiolita, en las acumulaciones de carbonato. Ambos rasgos son completamente similares a lo observado en los depósitos de Valdeinfierno. Una asociación similar entre montículos de descarga y minerales de la arcilla magnésicos ha sido registrada en la Cuenca de Amboseli, Kenia, por Hay y Stoessell (1983) y Hay *et al.* (1995).

La presencia de carbonatos con estructura columnar en la unidad U3, dispuestos sobre dolomías, constituye un aspecto novedoso en los depósitos originados por paleosurgencias de agua subterránea en la Cuenca de Madrid. Estas construcciones con morfología de travertinos se habrían originado en, al menos, dos etapas, con una transformación de carbonatos dolomíticos a calcíticos. El cambio se manifiesta asimismo en las asociaciones de minerales de la arcilla y en el registro isotópico. Así, se pasa de una asociación con dolomita en la que predominan los minerales de la arcilla autigénicos (sepiolita, esmectita trioctaédrica) a otra calcítica, con esmectita e illita de baja cristalinidad que se consideran de origen heredado.

Los rasgos estructurales y texturales de los carbonatos columnares sugieren una importante participación biogénica en su formación. Por su parte, los datos isotópicos correspondientes a $\delta^{18}\text{O}$, con valores claramente negativos (entre $-5,27$ y $-7,35\text{‰}$), permiten deducir un carácter diluido de las aguas en las que tuvo lugar la formación del carbonato, mientras que los valores muy negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (entre $-9,68$ y $-11,75\text{‰}$) indican la participación de comunidades biológicas en el aporte de carbono.

El carácter micrítico de la dolomita explica la composición no estequiométrica de este mineral en las muestras obtenidas en la sección de Valdeinfierno, con enriquecimiento en calcio y pobre ordena-

miento del carbonato (Lumsden y Chimahusky, 1980). Comparativamente y dentro de los niveles más ricos en dolomita, se ha observado un enriquecimiento en $\delta^{18}\text{O}$ en los carbonatos de la unidad U2 en relación con los de la unidad U3. Así, el contenido en $\delta^{18}\text{O}$ pasa de $-3,24\text{‰}$ en la muestra VALDE-3 (70% de dolomita) a $-3,87\text{‰}$ en la muestra VALDE-7 (85% de dolomita), lo que representaría el paso a condiciones de menor salinidad.

En las unidades U4 y U5 se reconocen cambios significativos, tanto desde el punto de vista mineralógico como textural y geoquímico, con respecto a las unidades infrayacentes. Un cambio significativo es el relativo a la mineralogía de la arcilla de las lutitas verdes, que en la unidad U4 consiste en una asociación de minerales heredados formada por esmectita dioctaédrica, illita y caolinita. Igualmente, la unidad de carbonatos estratificados (U5), a techo de la sección estudiada, presenta microfacies propias de un ambiente lacustre-palustre caracterizado por aguas más diluidas, donde es predominante la calcita y se reconocen bioclastos de agua dulce. Los datos isotópicos confirman este cambio, registrándose valores de $\delta^{18}\text{O}$ claramente negativos.

Las características sedimentológicas de los depósitos analizados en la sección de Valdeinfierno indican el paso de un ambiente lacustre marginal, con predominio de aguas salinas-alcalinas, a otro palustre-lacustre con evidencias de expansión lacustre y condiciones hidroquímicas más diluidas.

La presencia de depósitos travertínicos y de montículos carbonáticos (*seepage mounds*) en la sección de Valdeinfierno subraya la importancia de las surgencias de agua subterránea en la configuración de los dispositivos sedimentarios de la Cuenca de Madrid durante el Mioceno. La salida o rezume de las aguas en estas surgencias y la acumulación de carbonato derivada de ella tiene un efecto mecánico en los sedimentos previamente formados, al tiempo que supone un cambio ambiental por la entrada de agua con un quimismo diferente, aportando elementos que propiciaron el desarrollo de minerales de la arcilla autigénicos. El efecto mecánico de empuje provocado por la acumulación localizada de carbonatos da lugar a deformaciones por plegamiento y/o a roturas por cizalla a diversas escalas, en función del estado de consolidación del material afectado. Además de esto, la descarga de agua a través de surgencias supondría un mecanismo efectivo de alimentación a los sistemas lacustres desarrollados en la región y, en determinados momentos, la causa de los epi-

sodios de expansión lacustre constatados en áreas próximas a la zona de Valdeinfierno (Bellanca *et al.*, 1992; Pozo y Calvo, 2004).

Conclusiones

Las unidades U2 y U3 definidas en una sección estudiada en la zona de canteras de Valdeinfierno, área centro-meridional de la Cuenca de Madrid, contienen dos tipos de acumulaciones carbonáticas que se interpretan en relación con paleosurgencias de aguas subterráneas en un ambiente lacustre marginal. El primer tipo corresponde a depósitos de tipo «*seepage mound*», de composición dolomítica y textura brechoide, donde la abundancia de magnesio condujo a la formación de arcillas magnésicas. El segundo tipo de acumulación carbonática consiste en depósitos de tipo travertino, con una composición esencialmente calcítica, que se interpreta como el resultado de la transformación de dolomita previa. Este último aspecto implica un cambio hidroquímico sustancial, hacia condiciones más diluidas, del ambiente lacustre en que se formaron las acumulaciones de carbonato, lo que está en consonancia con lo deducido de datos isotópicos. Los carbonatos estratificados situados a techo de la sección (unidad U5) representan un episodio sedimentario claramente diferenciado de los anteriores, en el que los valores negativos de $\delta^{18}\text{O}$ y la presencia de facies bioclásticas ponen de manifiesto una fase de expansión lacustre en la zona, en parte abastecida por las aguas subterráneas procedentes de las paleosurgencias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado dentro del Proyecto de investigación CGL2005-03900/BTE financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia. Los autores queremos manifestar nuestro recuerdo más emotivo a la que fue compañera de muchas de nuestras investigaciones, la doctora Dolores Soria. Asimismo queremos agradecer al doctor Jorge Morales su inestimable colaboración en el proceso de edición de este trabajo.

Referencias

- Bellanca, A., Calvo, J. P., Censi, P., Neri, R. y Pozo, M. (1992). Recognition of lake-level changes in Miocene lacustrine units, Madrid Basin, Spain. Evidence from facies analysis, isotope geochemistry and clay mineralogy. *Sedim. Geol.*, 76: 135-153.

- Benson, L., Kashgarian, M. y Rubin, M. (1995). Carbonate deposition, Pyramid Lake subbasin, Nevada: 2 Lake levels and polar jet stream position reconstructed from radiocarbon ages and elevation of carbonates (tufas) deposited in the Lahontan basin. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 117: 1-30.
- Calvo, J. P., Pozo, M. y Jones, B. F. (1995a). Preliminary report of seepage mounds occurrences in Spain comparison with carbonate mounds from the Amargosa Desert, western USA. *Geogaceta*, 35: 143-146.
- Calvo, J. P., Jones, B. F., Bustillo, M., Fort, R., Alonso Zarza, A. M. y Kendall, C. (1995b). Sedimentology and geochemistry of carbonates from lacustrine sequences in the Madrid Basin, central Spain. *Chemical Geol.*, 123: 173-191.
- Hay, R. L. y Stoessell, R. K. (1984). Sepiolite in the Amboseli basin of Kenya: a new interpretation. En: Palygorskite-Sepiolite. Occurrences, genesis and Uses (editores, A. Singer y E. Galán), Elsevier, Amsterdam, 125-136.
- Hay, R. L., Pexton, R. E., Teague, T. T. y Kyser, T. K. (1986). Spring-related carbonate rocks, Mg clays, and associated minerals in Pliocene deposits of the Amargosa Desert, Nevada and California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 97: 1488-1503.
- Hay, R. L., Hughes, R. E., Kyser, T. K., Glass, H. D. y Liu, J. (1995). Magnesium-rich clays of the Meerschaum mines in the Amboseli basin, Tanzania and Kenya. *Clays Clay Miner.*, 43: 455-466.
- Lumsden, D. N. y Chimahusky, S. S. (1980). Relationship between dolomite non-stoichiometry and carbonate facies parameters. *Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Miner.*, Tulsa, 28: 123-137.
- Pozo, M. y Calvo, J. P. (2004). Mineralogía y geoquímica isotópica de facies carbonáticas del cerro de los Batallones (Cuenca de Madrid). Implicaciones paleoambientales. *MACLA*, 2: 31-32.
- Pozo, M. y Casas, J. (1997). Interpretación paleoambiental de depósitos siliciclásticos en el sector de Esquivias (Cuenca de Madrid). *Cuad. Geol. Ibér.*, 22: 389-406.
- Pozo, M. y Casas, J. (1999). Origin of kerolite and associated magnesium clays in palustrine-lacustrine environments. The Esquivias deposit (Neogene Madrid Basin, Spain). *Clay Miner.*, 34: 395-418.
- Pozo, M., Calvo, J. P., Casas, J., Medina, J. A., Silva, P. G. y Morales, J. (2005). Caracterización de formaciones carbonáticas travertínicas asociadas a facies detríticas del sector Batallones-Malcovadeso (Cuenca de Madrid). *MACLA*, 3: 165-166.

Recibido el 10 de octubre de 2006
Aceptado el 16 de noviembre de 2006