

# TIPOLOGIA Y SIGNIFICADO DE BIOTURBACIONES EN FACIES EVAPORITICAS CONTINENTALES: MIOCENO DE LA CUENCA DE MADRID

J.P. Rodríguez-Aranda

*Dpto. Petrología y Geoquímica. Fac. CC. Geológicas. Univ. Complutense. 28040 - MADRID.*

**Resumen:** Los complejos lacustres desarrollados durante el Mioceno en la Cuenca de Madrid están en buena parte constituidos por depósitos evaporíticos dentro de los cuales se reconocen diversos tipos de icnitas. En función del grado de bioturbación del sedimento, de la geometría y morfología de las trazas, sus dimensiones, estructuración interna y tipo de relleno, así como de las facies en que se presentan, se han distinguido seis tipos de icnitas: 1) Sistemas de chimeneas y túneles con relleno pasivo y diámetro de orden milimétrico, 2) Sistemas de chimeneas y túneles con relleno pasivo y diámetro de orden centimétrico, 3) Chimeneas y túneles con relleno en menisco y diámetro submilimétrico-milimétrico, 4) Chimeneas y túneles con relleno en menisco y diámetro de orden centimétrico, 5) Tubos con ramas verticales y horizontales, relleno masivo y diámetro de orden centimétrico, y 6) Pisadas de vertebrados. Los organismos causantes de estas bioturbaciones son, en el caso de las icnitas de tipo 1 y 2, raíces de plantas, herbáceas en el primer caso y arbustos en el segundo. Las icnitas de tipo 3, 4 y 5 son debidas a la acción de insectos (larvas de *Chironomidae*?, etc...) y anélidos. Tanto los insectos como los anélidos pueden haber tenido un cierto papel en la formación de algunas icnitas de tipo 1. Por su parte, las pisadas de vertebrados, atribuidas en algunas ocasiones a Hiénidos de pequeño tamaño y en otras a animales de mayor envergadura, forman un grupo aparte por sus características morfológicas. Los diferentes tipos de icnitas reconocidos se presentan por lo general asociados a una o más facies sedimentarias evaporíticas. Se han distinguido un total de 6 asociaciones de facies que comprenden ambientes y/o subambientes de llanura lútfica, margen lacustre y zonas lacustres más abiertas, apreciándose diferencias en cuanto al carácter efímero o perenne de estos lagos salinos. Las bioturbaciones presentes en los sedimentos evaporíticos estudiados permiten avanzar en la casuística de la interrelación bioturbación-alteración del sedimento y control de éstas sobre procesos diagenéticos, tanto tempranos como más tardíos, en depósitos evaporíticos. Los efectos de la bioturbación se centran en aspectos tales como distribución de carbonato y zonas de oxidación/reducción en el sedimento, reemplazamientos (p. ej. silicificaciones) y cementaciones, entre otros.

**Palabras clave:** Llanura lútfica, lago salino, bioturbación, icnita, diagénesis, Cuenca de Madrid.

**Abstract:** Lake complexes developed in the Madrid Basin through Miocene are largely formed of evaporite deposits (Calvo *et al.*, 1989 a; Ordóñez *et al.*, 1991). Several types of ichnites can be recognized within these sediments. On the basis of bioturbation degree, trace geometries and magnitudes, internal filling, and lithofacies in which the traces occur, six types of ichnites have been distinguished: 1) shaft and tunnel network formed of millimetric, passive filled tubes, 2) shaft and tunnel network formed of centimetric, passive filled tubes, 3) shafts and tunnels (burrows) showing back-filling, submillimetric to millimetric in diameter, 4) shafts and tunnels (burrows) with back-filling, centimetric in diameter, 5) traces with vertical and horizontal branches showing massive filling-centimetric in diameter, and 6) vertebrate tracks. The bioturbation of the evaporite sediments was caused either by plant roots, which is the case for type-1 (grass roots) and type-2 (bushes), or animals. Types-3, 4 and 5 are thought to be due to insects (larvae of *Chironomidae*?, etc...) and annelids. Insects and annelids also could play some role on the formation of some type-1 ichnites. On the other hand, vertebrate tracks, which may be attributed to small Hyenids or other bigger mammals, form a separate group of ichnites. Each ichnite type occurs commonly associated with one or more sedimentary facies. Six different facies associations that include the described ichnites have been distinguished: A) Mudflat-saline lake facies association, the flats being related to small alluvial fans; B) Mudflat-saline lake complex related to widely developed alluvial systems, C) Mudflat-ephemeral carbonate pond subenvironment; D) Mudflat-lake margin facies association; E) Ephemeral saline lake; and F) Lake margin-open saline lake association. An idealized model of distribution of the ichnites in these depositional systems is proposed. Bioturbation of the primary evaporite deposits leads to modification of both texture and fabric thus conditioning early and later diagenetic processes within the sediment. In this paper some of these aspects are considered and we make some emphasis on the role of bioturbation in diagenetic processes such as replacement and cementation of the evaporite deposits.

**Key words:** Mudflat, saline lake, bioturbation, ichnite, diagenesis, Madrid Basin.

Rodríguez-Aranda, J.P. (1997): Tipología y significado de bioturbaciones en facies evaporíticas continentales: Mioceno de la Cuenca de Madrid. *Rev. Soc. Geol. España*, 10 (3-4): 355-369.

La presencia de vida en los ambientes de sedimentación evaporíticos es un hecho constatable tanto en los medios de sedimentación actuales como en el registro geológico. A grandes rasgos, las comunidades bióticas de los ambientes evaporíticos se caracterizan por un predominio de organismos microbianos (bacterias y algas) frente a las poblaciones de metazoos y macroflora; estas últimas, aunque suelen incluir pocas especies, pueden ser muy numerosas (Friedman y Krumbein, 1985).

Los estudios recientes de ecosistemas y comunidades bióticas actuales en sabkhas y lagos salinos permiten una mejor comprensión de las relaciones entre los organismos y los sedimentos típicos de dichos ambientes. De esta manera, se pueden citar a modo de ejemplo los trabajos de Bauld (1986), De Deckker (1988) y Williams *et al.* (1990) en los lagos australianos; y de Evenary *et al.* (1985) y Gerdes *et al.* (1985 a, b) en ambientes costeros del Mediterráneo y Mar Rojo.

En el registro geológico evaporítico se observan con relativa frecuencia productos de actividad de organismos microbianos, tales como estromatolitos y facies de sulfatorreducción (Rouchy *et al.*, 1986), y con cierta frecuencia se encuentran restos de actividad de vegetación (Retallack, 1990). Sin embargo, la literatura geológica sobre actividad de metazoos en medios evaporíticos continentales es escasa y generalmente profundiza poco en su estudio (Chamberlain, 1975; Truc, 1978, 1980; Freytet y Plaziat, 1982; Tevesz y Mc

Call, 1982; Gierlowsky-Kordesh, 1991). Se deben mencionar de manera especial las referencias sobre bioturbación de sedimentos evaporíticos en las cuencas terciarias de la Península Ibérica. Así, entre otros, se pueden citar los trabajos de Corrochano y Armenteros (1989) en la Cuenca del Duero, de Salvany (1989) en la Cuenca del Ebro, de Arribas *et al.* (1991) en la Depresión Intermedia o Cuenca de Loranca, y de Rodríguez Aranda *et al.* (1991) y Rodríguez Aranda (1992) en la Cuenca de Madrid.

En la zona oriental de la Cuenca de Madrid (Fig. 1) afloran sedimentos de las Unidades Inferior e Intermedia del Mioceno (Fort *et al.*, 1982; Calvo *et al.*, 1989a; Rodríguez Aranda *et al.*, 1991), donde es posible observar un cortejo variado de trazas fósiles. Este trabajo estudia dichas trazas fósiles, centrándose fundamentalmente en los siguientes aspectos: (1) el significado sedimentario de la presencia de bioturbación y su relación con el ambiente deposicional y (2) la bioturbación como factor importante en la constitución de la facies, condicionamiento de la fábrica sedimentaria y diagenética.

Las escasas referencias a bioturbaciones en ambientes continentales evaporíticos antiguos dificulta notablemente el estudio de trazas fósiles en este tipo de ambientes. Conscientes de esta ausencia de sistemática sobre huellas fósiles en estas facies, su clasificación taxonómica y estudio etológico detallado queda fuera del marco del presente trabajo.

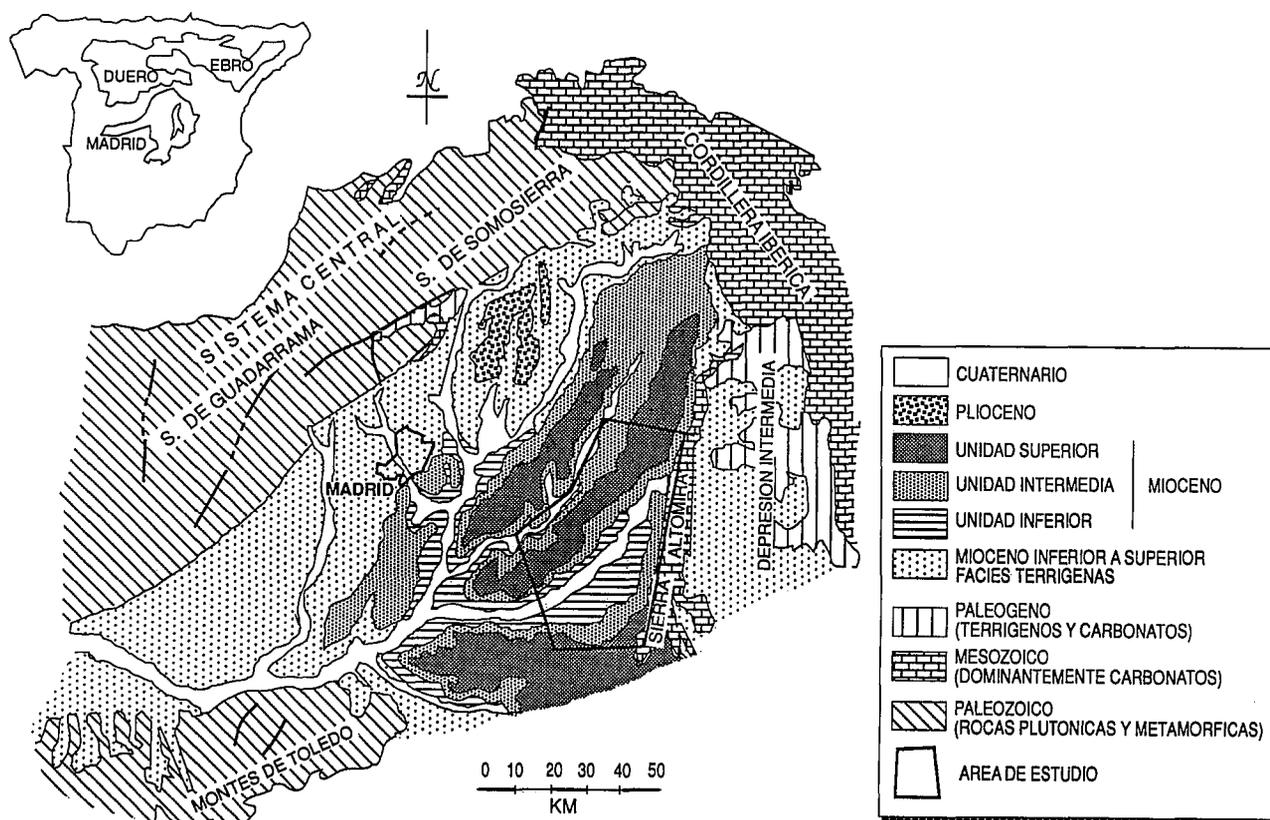


Figura 1.- Esquema geológico de la Cuenca de Madrid indicando la situación de la zona de estudio. Modificado de Ordóñez *et al.* (1991).

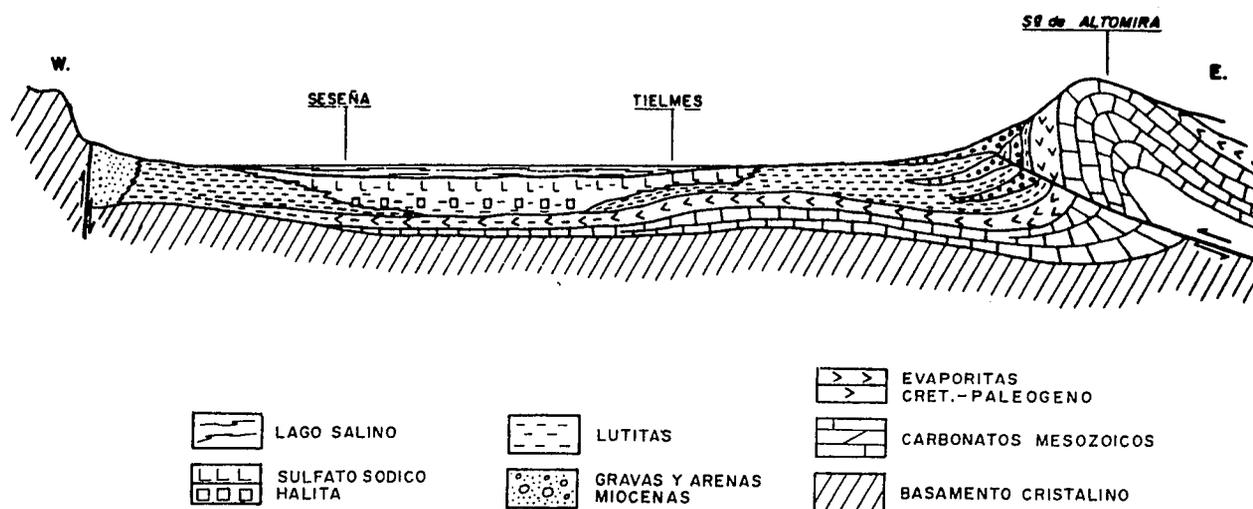


Figura 2.- Corte transversal idealizado (E-W) de la Cuenca de Madrid durante la sedimentación de la Unidad Inferior del Mioceno. Modificado de Calvo *et al.* (1989 a).

### Contexto geológico y sedimentario

La Cuenca de Madrid es una amplia cuenca, con extensión superior a los 10.000 km<sup>2</sup>, localizada en el centro de la Península Ibérica y desarrollada a lo largo del Terciario. El registro sedimentario neógeno es bastante completo y está representado por 600 a 1.000 m de espesor de sedimentos continentales. La evolución del relleno sedimentario fue muy continua durante ese periodo, con tasas de sedimentación relativamente altas (Calvo *et al.*, 1991), aunque con algunas discontinuidades o hiatos que delimitan varias unidades tectosedimentarias mayores dentro del registro neógeno (Alberdi *et al.*, 1984, Calvo *et al.*, 1990).

Durante gran parte del Mioceno (Ageniense a Vallesiense Inferior) la Cuenca de Madrid estuvo caracterizada por el desarrollo de sistemas lacustres de carácter evaporítico, correspondientes a cuencas hidrológica y geomorfológicamente cerradas (Calvo *et al.*, 1989 a, b). Dichos sistemas lacustres ocuparon grandes extensiones dentro de la cuenca, disponiéndose de acuerdo con un modelo concéntrico de dispositivos sedimentarios (Allen y Collinson, 1986; Eugster y Kelts, 1983).

Las asociaciones de facies evaporíticas formadas en los sistemas de llanura lutítica-lago salino muestran variaciones a lo largo del tiempo, pudiendo distinguirse un cambio entre las correspondientes a la Unidad Inferior del Mioceno (o Unidad Salina) (García del Cura, 1979) y la Unidad Intermedia del Mioceno (Calvo *et al.*, 1989 a). En la primera de estas unidades predominan facies que podríamos caracterizar en términos generales como hipersalinas, con formación de depósitos de anhidrita, halita, glauberita, thenardita, etc..., mientras que en la segunda, superpuesta estratigráficamente, los depósitos formados son propios de precipitación a partir de salmueras más diluidas. El mineral evaporítico mejor representado en este último caso es el yeso.

Hay que indicar, no obstante, que en algunos puntos de la cuenca, especialmente en las proximidades de la Sierra de Altomira y dentro de la zona de estudio (Fig. 1), la Unidad Inferior del Mioceno presenta facies yesíferas análogas a las observadas en la Unidad Intermedia. Este hecho es interpretado en relación con aportes de agua dulce procedentes de los bordes de cuenca al ámbito lacustre, con la consiguiente dilución de las salmueras.

En la figura 2 aparece representado un perfil a lo largo de la cuenca, desde su margen suroccidental (Montes de Toledo) hasta la Sierra de Altomira, al E. Este esquema está referido a la Unidad Inferior del Mioceno y en él aparece indicado el reparto de depósitos salinos desde los bordes de cuenca hacia el centro de la misma. En la parte oriental de la cuenca se observa una clara zonación de facies, desde facies proximales y medias de abanicos aluviales a facies distales y de llanura lutítica en la transición al margen lacustre. Típicamente, estas últimas facies, formadas predominantemente por lutitas, aparecen intensamente bioturbadas por raíces de dimensiones variables. Las sucesiones neógenas en este área de la cuenca muestran la alternancia en vertical de niveles lutíticos y evaporíticos (yeso, anhidrita, glauberita subordinada) que registra la fluctuación del nivel de agua del lago repetida con cierta periodicidad.

El esquema sedimentológico descrito para la Unidad Inferior del Mioceno aparece netamente cambiado para la Unidad Intermedia. Dentro de esta unidad los depósitos evaporíticos se presentan ampliamente extendidos en la parte oriental de la cuenca, llegando en algunos casos a disponerse directamente sobre el margen de la Sierra de Altomira (Calvo *et al.*, 1989 b; Rodríguez Aranda *et al.*, 1991). Esta situación está relacionada con el muy escaso desarrollo de abanicos aluviales en el borde E de la cuenca para este período. Las facies clásticas gruesas, brechas de cantos de car-

bonatos y yesos, aparecen adosadas al borde y pasan de forma rápida, lateralmente, a facies de llanura lutítica y lago salino. En las facies de lago salino se distinguen bancos de yeso de espesor métrico con un tono crema muy característico. Es en estos niveles donde se aprecia una bioturbación intensa, con morfologías típicas que se describen a continuación.

### Tipos de icnitas

De acuerdo con los criterios expuestos por García Ramos *et al.* (1989), se pueden distinguir en los sedimentos de las Unidades Inferior e Intermedia del Mioceno, al menos, seis tipos de Icnitas. Los criterios fundamentales utilizados para la clasificación son los siguientes: (1) grado de bioturbación, desde trazas aisladas a texturas bioturbadas; (2) geometría, orientación y posición de la traza; (3) dimensiones de las estructuras, desde microscópicas a métricas; (4) estructuración interna y tipo del relleno, relleno activo (*back-fill*, en menisco) o relleno pasivo (por gravedad, cementación, etc...); y (5) facies en las que típicamente se presentan las trazas.

De esta manera, los seis tipos de icnitas diferenciados en las facies evaporíticas miocenas son:

- TIPO 1: Sistemas de chimeneas y túneles con relleno pasivo y diámetro de orden milimétrico.
- TIPO 2: Sistemas de chimeneas y túneles con relleno pasivo y diámetro de orden centimétrico.
- TIPO 3: Chimeneas y túneles con relleno en menisco y diámetro submilimétrico-milimétrico.
- TIPO 4: Chimeneas y túneles con relleno en menisco y diámetro de orden centimétrico.
- TIPO 5: Tubos con ramas verticales y horizontales, relleno masivo y diámetro de orden centimétrico.
- TIPO 6: Pisadas de vertebrados.

#### *Icnitas de Tipo 1: Sistemas de chimeneas y túneles con relleno pasivo y diámetro de orden milimétrico*

El grado de bioturbación es de moderado a alto. Se trata de huellas de perforación que se encuentran a techo de niveles lutíticos, en menor proporción micríticos y dolomicríticos (con o sin lentículas de yeso) y más raramente yesíferos. Los niveles lutíticos pueden presentar nódulos de yeso, procedentes de hidratación de anhidrita, o cristales hemipiramidales de yeso.

El relleno de las bioturbaciones, de tipo pasivo, es comúnmente arcilloso, aunque puede presentar un contenido variable en carbonatos hasta constituir prácticamente una micrita. En algunos casos tienen cemento de yeso en mosaico, o bien conservan el hueco original más o menos transformado. A veces, se observan en el relleno glaébulas o estructuras alveolares. No se aprecia ornamentación externa ni estructura interna definida.

Constan de tubos cilíndricos, predominantemente verticales y poco ondulados, generalmente con pocas bifurcaciones y terminaciones dicotómicas. Diámetro:

0,5-3 mm. Longitud: 1-7 cm. Las icnitas se disponen agrupadas según sistemas que pueden organizarse en niveles lateralmente continuos de espesor centimétrico a decimétrico (Fig. 3A).

INTERPRETACIÓN: Rizolitos de plantas de pequeño porte, herbáceas (Klappa, 1980; Retallack, 1990), pudiendo corresponder algunas de las trazas a la actividad de artrópodos o anélidos.

#### *Icnitas de Tipo 2: Sistemas de chimeneas y túneles con relleno pasivo y diámetro de orden centimétrico.*

Grado de bioturbación de moderado a alto. Normalmente se corresponden con huellas de perforación, pero se pueden incluir dentro de este tipo de icnitas, como se verá más adelante, algunas huellas de excavación. Se observan a techo de niveles lutíticos y margosos, en ocasiones micríticos, que incluyen yeso lenticular intrasedimentario; con menor frecuencia, se reconocen en niveles de yeso mesolenticular y de carbonatos.

El relleno, que es pasivo y sin estructuración interna aparente, tiene composición fundamentalmente lutítico-calcárea o yesífera. La matriz lutítico-calcárea puede presentar cristales lenticulares de yeso. El relleno yesífero consta de mosaicos meso o microcristalinos, con cristales de morfologías anhedrales o lenticulares.

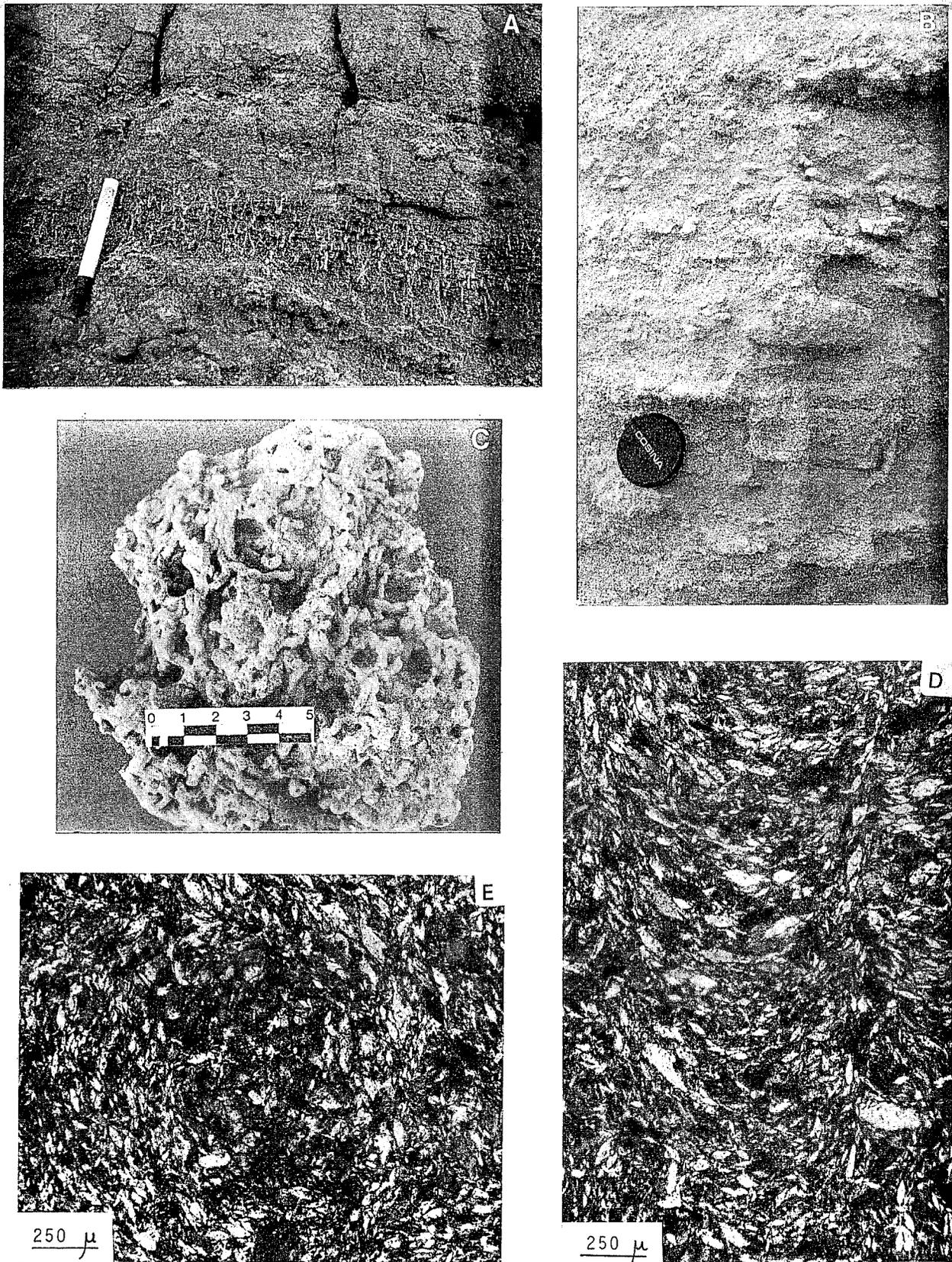
Las chimeneas y túneles son aproximadamente cilíndricos, muestran un diámetro medio de 0,5 a 2 cm y una longitud de 5 a 30 cm. Dichas estructuras tienen un índice de ramificación alto y se disponen según un esquema general en enrejado (Fig. 3B). Los *sistemas en enrejado* muestran hasta 1,5 m de longitud vertical y son discontinuos en la horizontal (desde 50 cm a varios metros de anchura). Aunque no presentan una ornamentación externa clara, se puede observar en las paredes de los tubos pequeñas protuberancias, de diámetro milimétrico, que parecen corresponderse con ramificaciones de tubos más pequeños.

INTERPRETACIÓN: Rizolitos de vegetación arbustiva (Klappa, 1980; Retallack, 1990). Descripciones de arbustos típicos de climas áridos-semiáridos con sistemas de raíces similares a este tipo de icnitas se encuentran, por ejemplo, en Evenary *et al.* (1985).

#### *Icnitas de Tipo 3: Chimeneas y túneles con relleno en menisco y diámetro submilimétrico-milimétrico.*

Grado de bioturbación generalmente alto (Fig. 3C) (*moteado de huellas de excavación*). La densidad de las trazas es en algunas ocasiones tan alta que se puede hablar incluso de *texturas bioturbadas*. Se trata de huellas de excavación que se encuentran incluidas dentro de niveles de facies lacustres: yesos micro y mesolenticulares unimodales, yesos mesolenticulares bimodales o micrita con yeso mesolenticular (Rodríguez Aranda *et al.*, 1992).

El relleno típico es yeso micro y mesolenticular o micrita con yeso lenticular, usualmente de las mismas características que la roca caja. Presenta una



**Figura 3.-** A) Niveles lutíficos de la Unidad Inferior del Mioceno con icnitas de tipo 1 (rizolitos de herbáceas). La escala mide 14 cm. B) Icnicas de tipo 2 (rizolitos de arbustos) en margas con yesos lenticulares de la Unidad Intermedia del Mioceno. La escala mide 5 cm de diámetro. C) Silicificación de yesos lenticulares mimetizando bioturbación (icnitas de tipo 3, huellas de excavación de larvas de insectos -Quironómidos-). Escala = 5 cm. D) Microfotografía de sección longitudinal de icnita de tipo 3 en yesos lenticulares. Obsérvese la estructura de estriotúbulo con relleno meniscado. E) Microfotografía de sección transversal de icnita de tipo 3 en yesos lenticulares. Obsérvese la estructuración en círculos concéntricos.

estructuración interna de las lentículas de yeso en menisco a modo de estriotúbulo (Brewer, 1964) (Fig. 3D). A veces, el relleno meniscado muestra láminas con diferentes proporciones de yeso y carbonato y/o distinto tamaño de lentículas de yeso. Los arcos que forman los segmentos intermeniscados tienen morfologías aproximadamente parabólicas. Las secciones transversales de las trazas muestran una distribución de las lentículas de yeso según círculos más o menos concéntricos (Fig. 3E). En el contacto entre la roca caja y el estriotúbulo se suele observar una alineación recta de las lentículas de yeso, que podría corresponderse con un reforzamiento de las paredes mediante impregnación con *mucus* (Frey y Pemberton, 1984; D'Alessandro y Bromley, 1987) (Fig. 3D). Además del típico relleno original en menisco, se pueden encontrar otros rellenos diagenéticos, generalmente sin estructuración interna, como cemento de yeso en mosaico, yeso secundario procedente de anhidrita y sílice microcristalina.

Estas icnitas consisten en tubos cilíndricos verticales, inclinados y horizontales, con una leve curvatura en sección longitudinal. Poseen un diámetro medio de 0,5 a 5 mm y una longitud en sección de hasta 5 cm, aunque normalmente es menor de 2 cm (Fig. 3C). Visto su tamaño, el estudio de estas icnitas se ha llevado a cabo fundamentalmente mediante microscopio petrográfico y lupa binocular. La concavidad de los segmentos intermeniscados puede ser tanto hacia arriba como hacia abajo, revelando movimientos del organismo generador tanto ascendentes como descendentes. Únicamente se observan ramificaciones que en realidad corresponden a superposición de diferentes icnitas, lo que en la terminología de D'Alessandro y Bromley (1987) se denominarían ramificaciones de *tipo falso y sucesivo secundario*.

A estas icnitas se encuentran asociados *peloides* micríticos, de 150 a 500  $\mu\text{m}$  de tamaño y morfologías elipsoidales y circulares. Estos peloides se han interpretado como *pellets fecales* y *pseudoheces* (Mc Call y Tevesz, 1982 a; Pueyo, 1991).

Referencias de icnitas similares a este tipo se pueden encontrar en Truc (1980), Bustillo y Díaz Molina (1980), Freytet y Plaziat (1982) y Salvany (1989).

**INTERPRETACIÓN:** Estructuras de alimentación y/o morada de larvas subacuáticas de insectos (Truc, 1980; Tevesz y Mc Call, 1982; Frey y Pemberton, 1984). Un factor que condiciona la interpretación es la no observación de esqueletos fósiles de otros posibles organismos bioturbadores (ostrácodos, unioides, gasterópodos). Las icnitas se atribuyen tentativamente a la familia *Chironomidae*. Esta atribución se basa en aspectos tales como la geometría y tamaño de las trazas, la gran variabilidad de tamaño que reflejaría los diferentes *estados larvarios*, la estructuración del relleno, el alto grado de bioturbación, su génesis bajo lámina de agua (Oliver, 1971; Mc Call y Tevesz, 1982 a; Fisher, 1982; De Deckker, 1988), la compatibilidad de dicha familia con salinidades relativamente altas

(Paterson y Walker, 1974; Williams *et al.*, 1990; Pueyo, 1991), etc. Se pueden encontrar citas de bioturbación por *Chironomidae* en sedimentos carbonáticos antiguos en Monty (1976), Anadón y Zamarreño (1981), Armenteros (1986) y Armenteros *et al.* (1986).

*Icnitas de Tipo 4: Chimeneas y túneles con relleno en menisco y diámetro de orden centimétrico.*

Grado de bioturbación de moderado a alto. Indicaremos que, sea cual sea la densidad de la bioturbación, los distintos individuos son bien diferenciables entre sí, al contrario de lo que ocurre en las icnitas de tipo 3. Representan huellas de excavación y se hallan incluídas en facies de margas y carbonatos con yesos lenticulares intrasedimentarios; menos frecuentemente se pueden encontrar en alternancias de yesos con carbonatos. Dentro de los niveles bioturbados, suelen concentrarse en horizontes determinados.

El relleno tiene naturaleza similar a la de la roca caja, siempre que ésta no haya sufrido algún proceso diagenético que altere de manera diferencial la naturaleza de la icnita. Salvo casos concretos, tales como morfologías cónicas o curvatura de los segmentos intermeniscados poco acusada, la estructuración del relleno y la morfología de estas icnitas son análogas a las de las icnitas de tipo 3 (Fig. 4A).

El diámetro medio, tanto de chimeneas como de túneles, varía de 0,5 a 3 cm y la longitud llega hasta 20 cm, estando en relación directa con el diámetro.

En Arribas *et al.* (1991) se describen icnitas similares a este tipo.

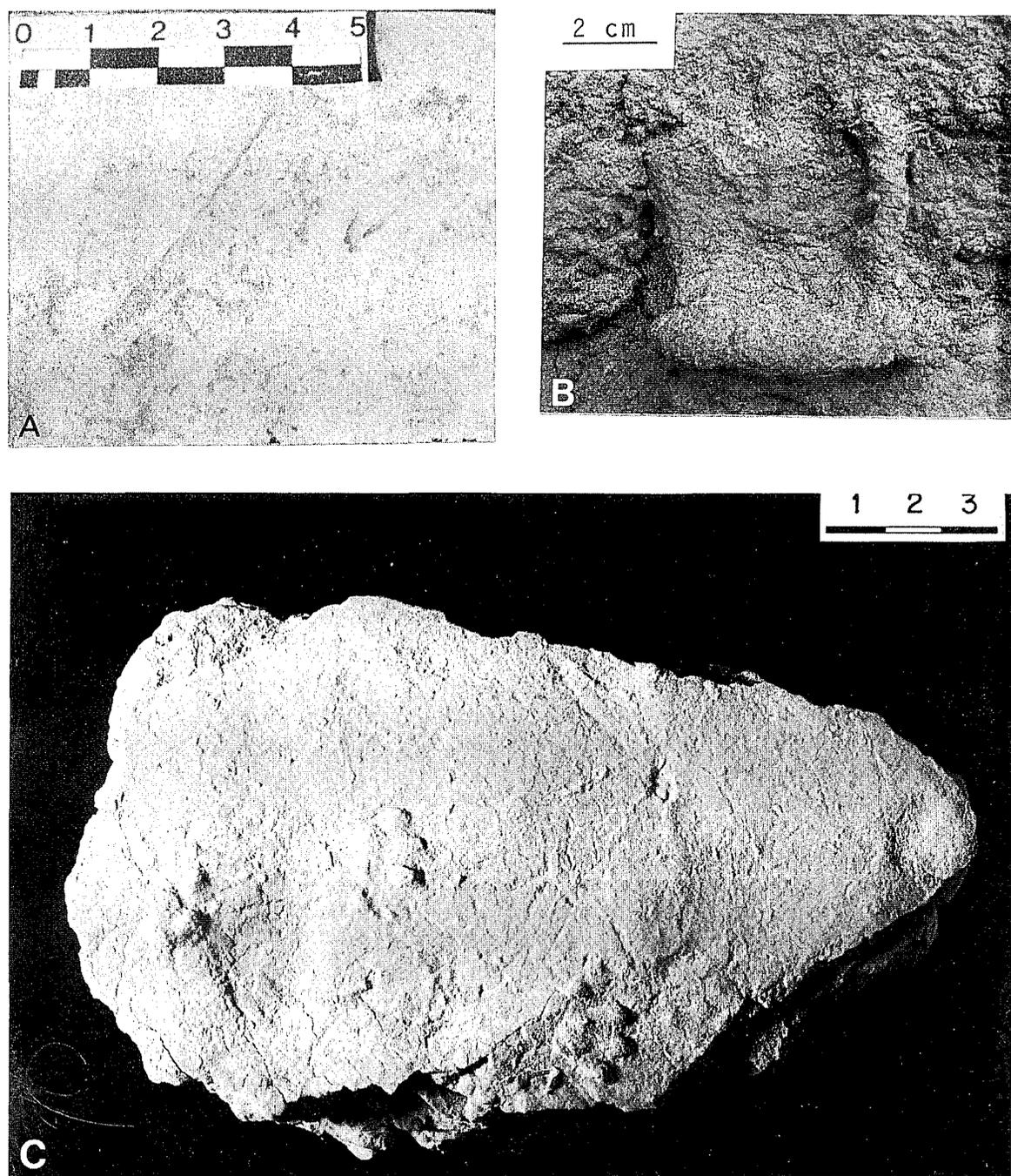
**INTERPRETACIÓN:** Estructuras de alimentación y/o morada de invertebrados: artrópodos (larvas o insectos adultos- coleópteros-, etc.), anélidos u otros (Chamberlain, 1975; Retallack, 1990). La excavación ha podido producirse tanto bajo lámina de agua como en un medio húmedo subaéreo (freático o vadoso). Como dato de referencia cabe decir que algunas especies de coleópteros admiten salinidades de hasta 250 g/l y de anélidos hasta 70 g/l (Gerdes *et al.*, 1985 a).

*Icnitas de Tipo 5: Tubos con ramas verticales y horizontales, relleno masivo y diámetro de orden centimétrico.*

Grado de bioturbación de bajo a moderado. Se trata de huellas de perforación o excavación que se hallan a techo de niveles lutíticos o bien, margosos con cristales lenticulares de yeso.

El relleno es masivo y consta de cemento de yeso con cristales de morfologías anhedrales o lenticulares; de forma muy ocasional pueden observarse rellenos parciales con cierta estructura interna meniscada. El contacto entre la roca caja y la icnita es neto y no se aprecia que ésta tenga ornamentación externa.

Los individuos constan de varias ramas más o menos cilíndricas, generalmente una vertical y otra horizontal, aunque, a veces, se intuye una segunda rama vertical (Fig. 4B). Las ramas forman entre ellas ángu-



**Figura 4.-** A) Sección pulida de margas con yesos lenticulares intrasedimentarios mostrando icnitas de tipo 4 (huellas de excavación de invertebrados). Obsérvese la morfología cónica de un ejemplar y el pequeño nódulo de carbonato a su derecha. Escala = 5 cm. B) Icniita de tipo 5 en yesos lenticulares con matriz margosa. Se distinguen una rama vertical y otra horizontal y se intuye una segunda rama vertical. C) Rastro de icnitas de tipo 6 (huellas de vertebrados) subtipo 1. Escala = 3 cm.

los próximos a 90°. El diámetro de los tubos oscila de 0,5 a 3 cm (1-2 cm de moda), siendo la longitud de cada rama de 3 a 7 cm. Para un mismo individuo, las diferentes ramas tienen longitudes similares. Los tubos horizontales suelen estar aplanados por compactación del sedimento.

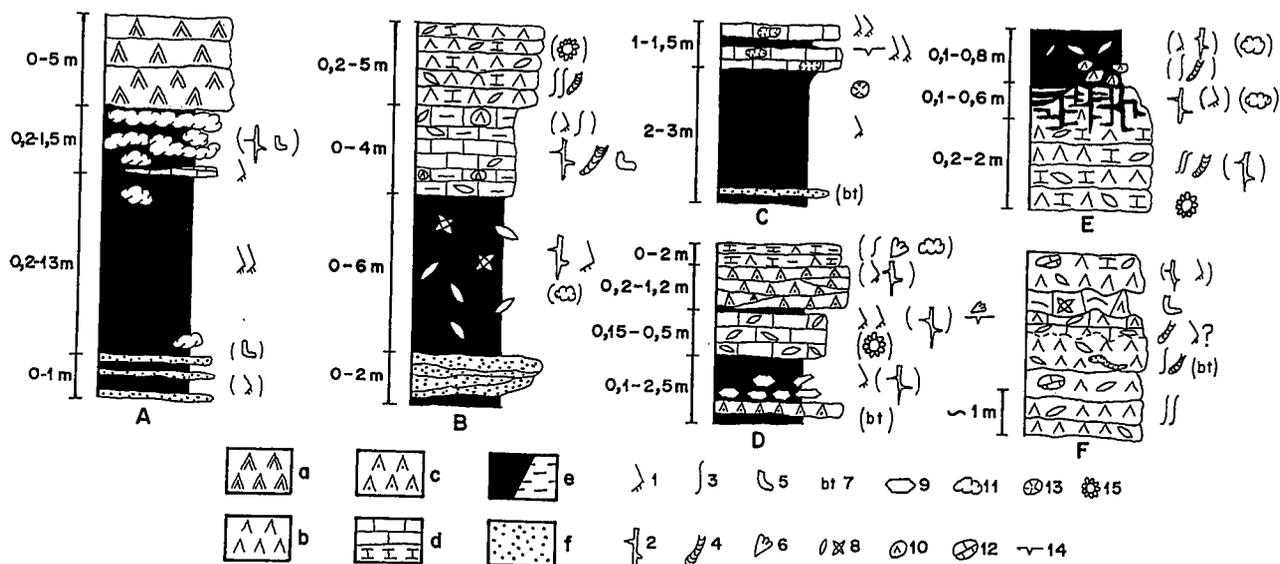
**INTERPRETACIÓN:** Estructuras de morada de invertebrados (Chamberlain, 1975; Frey y Pemberton, 1984), posiblemente de coleópteros. Referencias de estructuras relativamente parecidas a las descritas se pueden

encontrar, por ejemplo, en Smith y Hein (1971) y Retallack (1990).

*Icnitas de Tipo 6: Pisadas de vertebrados.*

Dentro de este tipo de icnitas se incluyen marcas y calcos de huellas de pisadas de vertebrados y pequeños rastros (Fig. 4C). Únicamente se han encontrado en dos afloramientos sobre niveles margoso-yesíferos.

Se distinguen dos subtipos. El primer subtipo se corresponde con huellas de unos 2 cm de longitud donde se observan las impresiones de cuatro dedos (Fig.



**Figura 5.-** Asociaciones de facies distinguidas en la zona de estudio, explicación en el texto. **Litología:** a) yesos secundarios, b) yesos primarios de precipitación química, c) yesos detríticos, d) carbonatos, e) lutitas, f) areniscas. **Simbología:** 1) icnitas de tipo uno, 2) icnitas de tipo dos, 3) icnitas de tipo tres, 4) icnitas de tipo cuatro, 5) icnitas de tipo cinco, 6) icnitas de tipo seis, 7) bioturbación no tipificada, 8) lentículas de yeso, 9) cristales hemipiramidales tabulares de yeso, 10) nódulos de yeso, 11) nódulos de anhidrita, 12) nódulos de carbonato, 13) geodas, 14) grietas de retracción 15) caráceas.

4C). El segundo subtipo consiste en depresiones, más o menos circulares, de 5-6 cm de diámetro y 1 cm de profundidad, sin señales bien definidas de dedos u otras estructuras. Actualmente se hallan en fase de estudio.

**INTERPRETACIÓN:** El primer subtipo se ha interpretado como huellas de un hiénido de pequeño tamaño. El segundo, como impresiones sobre un substrato blando de patas embarradas o pezuñas, pertenecientes a un animal de cierta envergadura (J. Morales y L. Alcalá, comunicación personal, 1992).

#### Relación de las icnitas con ambientes de sedimentación

Las icnitas estudiadas se encuentran en asociaciones de facies características de complejos de llanura lutítica-lago salino. Dentro de estos complejos, se pueden distinguir, a su vez, distintos subambientes sedimentarios (Hardie *et al.*, 1978): llanura lutítica seca, llanura lutítica salina, charcas efímeras, lago efímero, margen lacustre, etc.

En este capítulo se describen someramente las facies y asociaciones de facies donde se observan los diferentes tipos de icnitas considerados. En esta descripción se relacionan, por tanto, dichos tipos con los ambientes y subambientes sedimentarios donde típicamente aparecen.

Se han distinguido seis asociaciones de facies principales (Fig. 5): A) asociación de llanura lutítica-lago salino, relacionada con sistemas aluviales de escaso desarrollo, B) asociación de llanura lutítica-lago salino, relacionada con sistemas aluviales de gran extensión, C) asociación de llanura lutítica, con charcas efí-

meras carbonáticas, D) asociación de llanura lutítica-margen lacustre, con carbonatos y yesos detríticos, E) asociación de lago salino efímero, con períodos amplios de exposición subaérea, y F) asociación de margen lacustre-lago salino.

#### *Asociación de llanura lutítica-lago salino, relacionada con sistemas aluviales de escaso desarrollo (Fig. 5A)*

Está constituida por facies características de un subambiente de llanura lutítica seca siliciclástica: lutitas pardas, verdes y rojizas de composición illítico-esmectítica o paligorskítica con contenidos variables en illita y esmectita. Estas llanuras lutíticas corresponden a depósitos distales de abanicos aluviales de escaso desarrollo, cuyas cabeceras se situaban en la Sierra de Altomira (Rodríguez Aranda *et al.*, 1991). Las lutitas pueden intercalar niveles tabulares, de espesor centimétrico-decimétrico, de litarenitas con cemento de sulfato cálcico y más raramente carbonatos micríticos.

Los sedimentos descritos presentan desarrollo de nódulos intrasedimentarios desplazativos de anhidrita (actualmente yeso), que, en ocasiones, se organizan según niveles decimétricos de aspecto arrosariado. Esta facies representa depósitos de llanura lutítica salina, y muy frecuentemente aparece dispuesta sobre los términos siliciclásticos descritos anteriormente.

A veces, se observan asociadas facies de yeso secundario en bancos tabulares, procedentes del reemplazamiento de anhidrita, glauberita, halita, etc. Estos minerales evaporíticos habrían precipitado en un subambiente lacustre de alta salinidad (Rodríguez Aranda *et al.*, 1991).

Las facies lutíticas muestran una gran proporción de icnitas de tipo 1 (Fig. 3A). Igualmente muestran estas icnitas los niveles carbonáticos y, en algunos casos, los areniscosos (facies de charcas efímeras y mantos de arroyada respectivamente).

Las icnitas de tipo 1, vegetación herbácea de pradera y/o humedales, son muy abundantes al pie de los sistemas de abanicos aluviales, en probables zonas de surgencia de agua (Rodríguez Aranda *et al.*, 1991). Su mayor o menor desarrollo está controlado por la velocidad de sedimentación y la duración de las interrupciones sedimentarias (Wright, 1989). El ambiente pudo ser relativamente salino pues, si bien el influjo de la salinidad es muy importante en el momento de la germinación, se reduce considerablemente para los individuos adultos (Evenary *et al.*, 1985).

*Asociación de llanura lutítica-lago salino, relacionada con sistemas aluviales de gran extensión (Fig. 5B)*

Se compone de lutitas rojas, algo arenosas, que presentan gran proporción de meso y macrocristales lenticulares de yeso intrasedimentario, a veces organizados según rosetas; más raramente incluyen micronódulos de anhidrita. En ocasiones, intercalan cuerpos areniscosos tabulares o canaliformes. Estas facies se interpretan en conjunto como características de una llanura lutítica siliciclástica relacionada con sistemas de abanicos aluviales relativamente grandes (precedentes del Sistema Central y/o borde NE de la cuenca), y en ellas se encuentran icnitas de los tipos 2 y 1 (vegetación arbustiva y herbácea).

Asociadas a las lutitas, aparecen facies de margas yesíferas y, menos frecuentemente, micritas y dolomicritas blancas. Las margas incluyen cristales lenticulares de yeso y numerosos nódulos de yeso alabastrino de diámetro centimétrico, generados y emplazados a favor de icnitas de los tipos 4, 2 y 5 (Fig. 3B). Las icnitas de tipo 2 están representadas a veces por rizocreaciones carbonáticas. De forma ocasional, se observan icnitas de los tipos 3 y 1. Las facies margoso-carbonatadas descritas se corresponden con facies de llanura lutítica-carbonatada y margen lacustre.

El último término de esta asociación, que tiene un cierto carácter secuencial, consta de niveles tabulares de yesos lenticulares y carbonatos yesíferos color crema, típicos de un subambiente lacustre salino (Rodríguez Aranda *et al.*, 1992). Las condiciones de salinidad no debieron de ser extremadamente elevadas, tal y como atestigua la presencia de restos de caráceas en esta facies. Burne *et al.* (1980) han observado caráceas con vida funcional en los lagos australianos hasta valores de salinidad de 70 ‰. En estos yesos son comunes las icnitas de tipo 3 y 4. Como ya se ha indicado anteriormente, los valores de salinidad tolerados por algunas especies de la familia *Chironomidae* y por ciertos anélidos (*Oligochaetes*) son superiores a los estrictamente necesarios para la precipitación de yeso y carbonato evaporítico en un medio continental. West *et*

*al.* (1979) midieron salinidades de 31-61 ‰ en salmueras de sabkhas del Mediterráneo a partir de las cuales precipitaba yeso.

Parece observarse una mayor proporción de icnitas de tipo 3 en los sedimentos más yesíferos y de tipo 4 en sedimentos más carbonatados. Este hecho, junto con la presencia de las icnitas de tipo 4 en los términos margosos de la asociación, parece indicar una relación de dichas icnitas con un medio marginal más diluido y/o con períodos de dilución de la salmuera lacustre. Arribas *et al.* (1991) sitúan facies con bioturbaciones similares a las icnitas de tipo 4 en una posición marginal lacustre.

*Asociación de llanura lutítica, con charcas efímeras carbonáticas (Fig. 5C)*

Consta de dos términos: uno lutítico rojizo, con horizontes de tono verdoso y pasadas de niveles tabulares decimétricos de areniscas de grano fino a medio, y otro de micritas blancas; estas últimas suelen presentar alguna lámina de lutitas intercalada. Los dos términos están intensamente bioturbados por raíces de herbáceas (icnitas de tipo 1).

Esta asociación se interpreta como facies características de llanuras lutíticas asociadas a sistemas de abanicos de gran extensión. En dicho ambiente se desarrollaban charcas carbonáticas efímeras y esporádicamente se producían influjos de mantos de arroyada con carga arenosa.

Aunque en esta asociación de facies no se encuentran evaporitas, existen indicios de su presencia originalmente en el sedimento, tales como abundantes geodas de calcita, *boxworks* y pseudomorfo de cristales lenticulares de yeso (Warren *et al.*, 1990).

*Asociación de llanura lutítica-margen lacustre, con carbonatos y yesos detríticos (Fig. 5D)*

Esta asociación está formada por tres litofacies diferentes: lutitas verdes yesíferas, yesos detríticos y carbonatos yesíferos; además, se puede incluir en ella un término de carbonatos y yesos color crema.

Las facies lutíticas suelen presentar crecimientos desplazativos de cristales hemipiramidales de yeso con morfologías tabulares, típicos de un ambiente de llanura lutítica salina (Sanz *et al.*, 1991). En estas facies se pueden observar icnitas de tipo 1 y, más raramente, de tipo 2.

Asociados estrechamente a las lutitas, aparecen niveles de yesos detríticos que proceden de removilización por mantos de arroyada de las facies lutítico yesíferas, o bien, de retrabajamiento por el oleaje de yesos lacustres (Sanz *et al.*, 1994). En estos niveles se pueden observar icnitas de los tipos 1 y 2, otras bioturbaciones con relleno lutítico no tipificadas, y huellas de vertebrados (icnitas de tipo 6, subtipo 2).

Las facies carbonáticas constan de micritas o dolomicritas con mayor o menor proporción de lenticulas de yeso (a veces pseudomorfo calcíticos). En algunas ocasiones, se distinguen laminaciones estromatolíticas milimétricas y restos de filamentos

cianobacterianos y, en otras, tallos y oogonios de caráceas. Se interpretan como facies de charcas carbonáticas o tapices cianobacterianos, desarrollados en un ambiente de llanura lutítica (De Deckker, 1988; Rodríguez Aranda *et al.*, 1991). Sobre esta matriz carbonática crecerían lentículas de yeso intrasedimentarias. Los niveles carbonáticos muestran comúnmente hacia techo icnitas de tipo 1.

El término carbonático-yesífero color crema representa las facies iniciales de expansión de un cuerpo de agua lacustre sobre la llanura lutítica. Se compone de carbonatos micríticos, a veces microesparíticos, y yesos lenticulares (generalmente yesolutitas) laminados, que pueden intercalar niveles milimétricos de arcillas. En estas facies, donde ocasionalmente se desarrollan *ripples* de interferencia, se han encontrado icnitas de tipo 6 subtipo 1 (Fig. 4C), hecho que revela la escasa profundidad de la lámina de agua.

#### *Asociación de lago salino efímero, con períodos amplios de exposición subaérea (Fig. 5E)*

Consta de bancos de yeso y carbonatos yesíferos color crema, estructurados en niveles tabulares decimétricos, y de lutitas verdosas, que pueden tener una proporción en yeso muy elevada.

Las facies yesífero-carbonáticas color crema son similares a las de la Asociación B (típicas de ambiente lacustre salino), con la particularidad de presentar hacia techo una alta proporción de icnitas de tipo 2 y, esporádicamente, de tipo 1. Reflejan períodos de desecación del lago y exposición subaérea. Cuando la bioturbación por vegetales es muy intensa, se llega a observar un nivel de espesor variable, compuesto por una mezcla de yeso, carbonato y lutita, donde resulta difícil distinguir la fábrica original. Dicho nivel muestra rasgos de procesos de *pseudomicrokarstificación* (Freytet y Plaziat, 1982; Alonso Zarza *et al.*, 1992) (Fig. 6A). Se suelen observar, además, otras señales de emersión, como paleokarstificaciones incipientes (Fig. 6-B), generalmente posteriores a la colonización por vegetales, y, más raramente, nodulizaciones de anhidrita.

Los sedimentos lutíticos fosilizan, cuando las hay, las superficies paleokársticas e incluyen lentículas de yeso, a veces nódulos de anhidrita y, con bastante frecuencia, agregados de yeso alabastrino de orden centimétrico. Los agregados de yeso alabastrino se desarrollan y emplazan a favor de icnitas de tipo 4 y 3. Además, dentro de esta facies se pueden observar icnitas de tipo 1 o 2. Estos sedimentos lutítico-yesíferos se interpretan como productos de decantación en un medio lacustre de salmueras diluidas o en pequeñas charcas. Las evaporitas que incluyen se generarían en momentos de concentración de la salmuera en medio vadoso o freático.

En conjunto, la asociación de facies representa un medio lacustre salino efímero, de salinidad no muy elevada, con momentos de exposición subaérea y períodos de dilución de las salmueras. Los momentos de exposición debieron ser lo suficientemente importantes como

para que en ellos se generaran microkarstificaciones.

#### *Asociación de margen lacustre-lago salino (Fig. 5F)*

Se compone de niveles tabulares decimétricos de yeso mesolenticular bimodal y yeso micro-mesolenticular unimodal (Rodríguez Aranda *et al.*, 1992), de colores cremas o verdosos, que se estructuran, a su vez, en bancos de orden métrico. Estas facies son típicas de zonas centrales de un ambiente lacustre salino, presentando una bioturbación intensa con desarrollo de icnitas de los tipos 3 y 4 (Fig. 3C, D y E).

La proporción de matriz carbonática deposicional en los niveles de yeso es muy baja o incluso nula; sin embargo, a techo de los bancos se observan acumulaciones calcáreas dispersas (nodulizaciones), de 1 a 80 cm de tamaño (Fig. 4A), o bien, carbonataciones desarrolladas en horizontes, de 10-20 cm de espesor, que reemplazan al yeso (Fig. 6C). Las carbonataciones se desarrollan frecuentemente a favor de icnitas de tipo 4 (Fig. 6C). Al microscopio se observan, además, indicios de bioturbación por raíces. Estos carbonatos podrían estar ligados a procesos edáficos de lavado en momentos de desecación-retracción del lago (Freytet y Plaziat, 1982) y/o procesos de precipitación por bombeo evaporítico a partir de aguas freáticas (Hsü y Siegenthaler, 1969).

También pueden encontrarse en esta asociación facies de margas yesíferas con cristales intrasedimentarios de yeso. A techo de algunos niveles de margas yesíferas se observa una abundancia relativa de icnitas de tipo 5 (Fig. 4B). Estas facies se interpretan como propias de un medio lacustre marginal (llanura lutítica carbonatada) con alternancia de períodos de inundación y emersión.

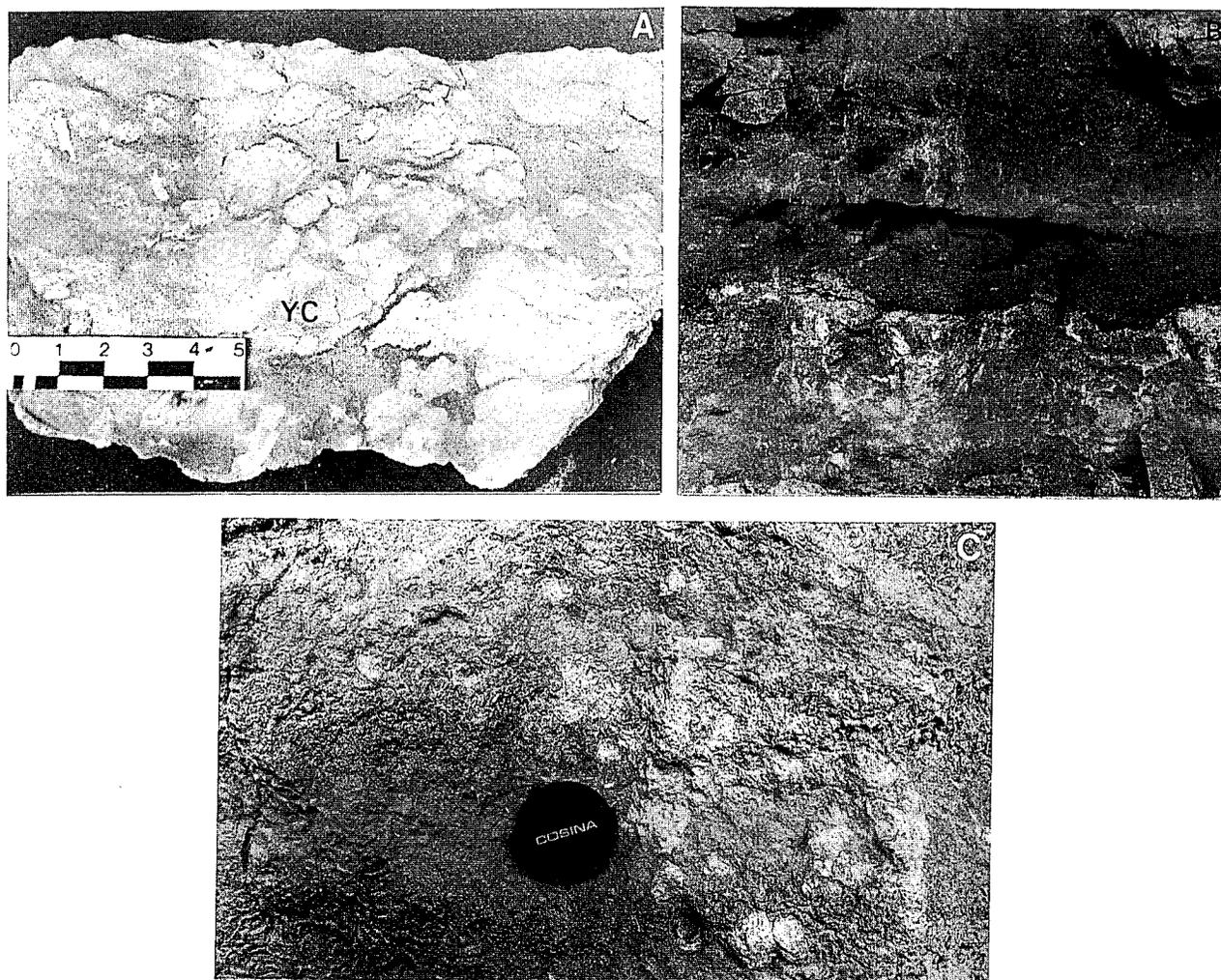
## Discusión

Los principales factores que influyen en la presencia y distribución de especies en ambientes evaporíticos son, entre otros: régimen hidrológico, salinidad, presencia de determinados iones, temperatura, disponibilidad de nutrientes, depredadores, competencia entre especies y velocidad de sedimentación (Friedman y Krumbein, 1985; De Deckker, 1988; Williams *et al.*, 1990). La importancia de cada factor depende de su *valor*, más o menos extremo, y de las especies en cuestión.

En la figura 7 se sitúan los diferentes tipos de icnitas dentro de un modelo sedimentario idealizado. De esta manera, se relacionan las icnitas con los ambientes sedimentarios en los que más típicamente aparecen, deducidos por el análisis de las asociaciones de facies y el propio estudio de las icnitas.

A modo de resumen, se enumeran seguidamente las relaciones principales de los seis tipos de icnitas con los ambientes y subambientes de sedimentación, teniendo en cuenta la interpretación que se les da en este trabajo:

- **TIPO 1** (vegetación herbácea de pradera o



**Figura 6.-** A) Efecto de bioturbación por raíces (icnitas de tipo 2) sobre un substrato de yeso y carbonato; L: lutitas con yeso; YC: yeso-carbonato. Escala = 5 cm. Asociación E. B) Niveles tabulares de yeso crema con una intercalación lutítica que fosiliza una superficie de microkarstificación (asociación E). C) Reemplazamientos de yeso lenticular por calcita a favor de icnitas de tipo 4. (Asociación F). El diámetro de la escala mide 5 cm.

humedales): Se observan en facies de llanura lutítica siliciclástica y charcas efímeras carbonáticas. El rápido desarrollo de la vegetación herbácea permite que ésta colonice ambientes muy poco favorables si, aunque sea esporádicamente, se dan periodos con las condiciones adecuadas.

- **TIPO 2** (vegetación arbustiva): Se presentan fundamentalmente en facies de llanura lutítica siliciclástica y carbonatada y en facies de lago salino desecado. Su distribución parece indicar la necesidad de un ambiente no excesivamente salino. Al menos, de salinidad inferior a los ambientes donde se hallan algunas icnitas de tipo 1, en los que tenía lugar la precipitación de anhidrita.

- **TIPO 3** (larvas de insectos, Quironómidos): Se encuentran en facies de lago salino. Reflejan una proliferación muy alta de individuos en un medio donde, por las condiciones extremas (salinidad, temperatura, presencia de iones, etc...), no tendrían competidores y depredadores efectivos; por otro lado, la disponibilidad

de nutrientes en el medio estaba garantizada (cianobacterias, algas, etc.). Estas icnitas indican salmueras no necesariamente hipersalinas; en principio, de concentraciones menores a 150 g/l (Paterson y Walker, 1974; Williams *et al.*, 1990; Pueyo, 1991).

- **TIPO 4** (larvas, insectos adultos y/o anélidos): Se hallan en facies de medios marginales lacustres y lacustres abiertos, aparentemente en relación con zonas o momentos de dilución relativa de la salmuera.

- **TIPO 5** (coleópteros y otros insectos): Su frecuencia es relativamente escasa comparada con la de las icnitas anteriores. Se observan en facies marginales lacustres con exposiciones subaéreas y de llanura lutítica.

- **TIPO 6** (vertebrados): Se presentan en facies de llanura lutítica y marginales lacustres de salinidad no elevada, si bien la relación entre estas icnitas y el ambiente de sedimentación tiene una componente de conservación tafonómica y de azar (hallazgo) que se debe considerar.

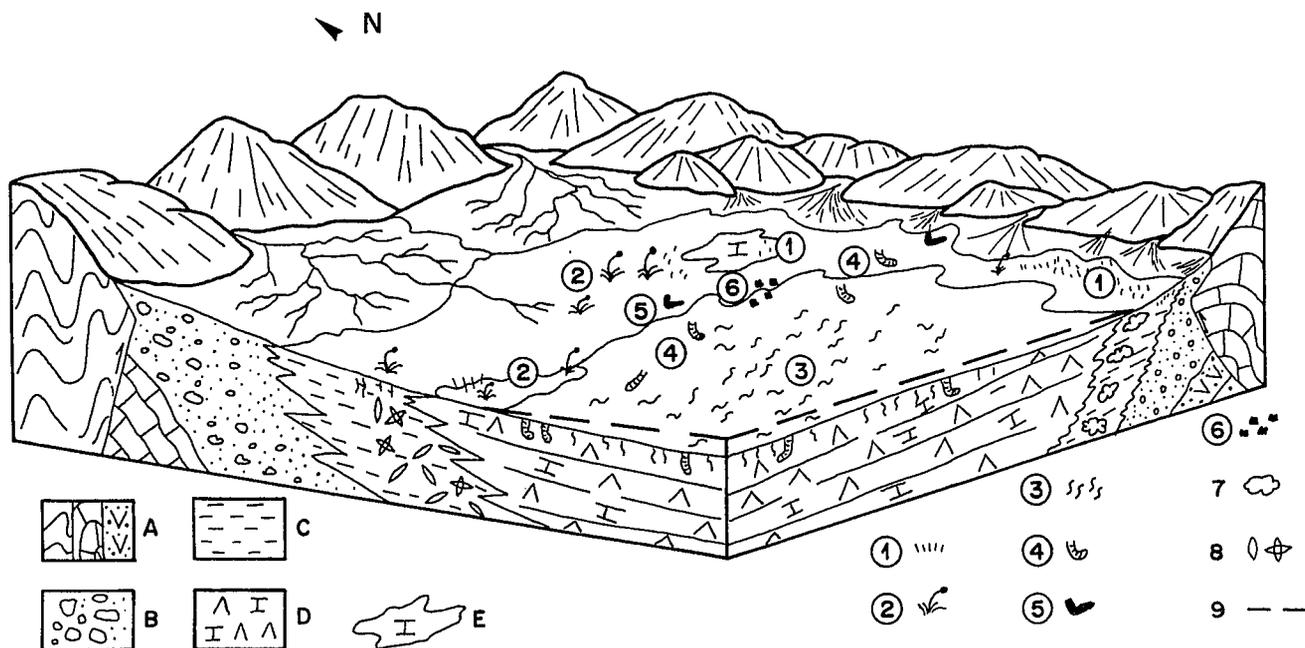


Figura 7.- Modelo sedimentario idealizado integrando los distintos ambientes donde aparecen los diferentes tipos de icnitas estudiadas. **Leyenda:** A) borde de cuenca, B) abanicos aluviales, C) llanura lutítica, D) lago salino, E) charca carbonática efímera, 1) icnitas de tipo uno, 2) icnitas de tipo dos, 3) icnitas de tipo tres, 4) icnitas de tipo cuatro, 5) icnitas de tipo cinco, 6) icnitas de tipo seis, 7) nódulos de anhidrita, 8) lenticulas intrasedimentarias de yeso, 9) nivel medio del lago.

### Relación entre procesos diagenéticos y bioturbación

El papel jugado por la bioturbación en cuanto alteración diagenética temprana de la textura y fábrica de los sedimentos ha sido puesto de manifiesto por diversos autores (Friedman y Sanders, 1978; Mc Call y Tevesz, 1982 b; García Ramos *et al.*, 1989).

El efecto o efectos de la alteración de la fábrica original aparece relacionado con la mezcla de sedimentos y la generación de anisotropía en ellos, dando lugar a diferencias de porosidad y permeabilidad, que condicionan el movimiento de fluidos en el cuerpo sedimentario, y a posibles diferentes estados de fluido en los poros. Por otra parte, la actividad de los organismos productores de la bioturbación origina en muchos casos micro o mesoambientes químicos que propician la precipitación diferencial de distintas fases minerales.

En el caso estudiado, se observa una casuística bastante amplia en cuanto a los efectos diagenéticos que la bioturbación condiciona en depósitos evaporíticos de medio continental.

Por una parte, se pueden destacar las carbonataciones inducidas por la presencia de raíces en el ámbito de llanura lutítica-margen lacustre, rasgos estrechamente relacionados con las icnitas de tipo 1 y 2. Los mecanismos de precipitación de carbonato en el microambiente de las paredes de las raíces han sido expuestos en detalle por Calvet (1975), Klappa (1980) y Jones (1988),

entre otros. Las escalas a que este proceso tiene lugar pueden ser variables. Estos procesos de carbonatación se han observado también en icnitas de tipo 4 generadas por fauna (Fig. 6C).

Por otra parte, la presencia tanto de raíces como de infauna origina microambientes dentro del sedimento donde las condiciones de oxidación-reducción aparecen alteradas, presentándose morfologías diagenéticas tempranas características, como tonalidades de color rojizo-verdosas (Mc Call y Tevesz, 1982 a; Fisher, 1982; Retallack, 1990). Las icnitas de tipo 1 consideradas en este trabajo ejemplifican ese efecto.

Dada la particularidad de algunas de las facies reconocidas, puede resaltarse también la incidencia de los organismos bioturbadores, mediante contribución de sustancias orgánicas en el sedimento (humus, mucus segregado por fauna, *pellets* fecales, etc...), en el control de la morfología de cristales de yeso y/o en la precipitación de fases sulfatadas. Estos aspectos han sido ampliamente resaltados para el caso de los hábitos lenticulares de yeso (Cody, 1979, 1991; Cody y Cody, 1988) y para la precipitación de anhidrita (Cody y Hull, 1980). Como dato de referencia, se da la circunstancia de que en el registro geológico evaporítico las facies yesíferas con icnitas de tipo 3 y 4, o similares, poseen morfología cristalina lenticular (Truc, 1980; Bustillo y Díaz Molina, 1980; Corrochano y Armenteros, 1989; Salvany, 1989; etc...).

Respecto al condicionamiento en la precipitación de fases sulfatado cálcicas, anhidrita o yeso, a favor de

bioturbaciones de plantas (icnitas de tipo 2 y 1, Fig. 3B), se deben considerar, además de los ya indicados, otros tres factores: permeabilidad diferencial a partir de raíces descompuestas (Stoops e Ilaiwi, 1981), presencia de fluidos con iones en disolución dentro de la planta (Glennie y Evamy, 1968) y actividad evapotranspiradora de la planta (Gunatilaka *et al.*, 1980).

Las facies yesíferas muestran con cierta frecuencia reemplazamientos por sílice (Bustillo, 1976). Cuando estos reemplazamientos se producen sobre facies bioturbadas, suelen mimetizar la bioturbación (Fig. 3C) y dan lugar a facies denominadas *silex tobáceo* o *silex tubular* (Bustillo y Díaz Molina, 1980; Arribas *et al.*, 1991). Este mimetismo se aprecia, bien por una silicificación diferencial a favor de la bioturbación o bien por una diferencia textural neta entre la silicificación que afecta a la roca caja (*rosetas de cuarzo*) y la que se encuentra en la bioturbación (cuarzo microcristalino). Los procesos diagenéticos de silicificación, probablemente muy tempranos, reflejan los microambientes generados fundamentalmente por fauna (icnitas de tipo 3 y 4) (Bustillo y Díaz Molina, 1980; Arribas *et al.*, 1991).

El efecto de mezcla de sedimentos por los organismos bioturbadores es patente sobre todo en las icnitas de tipo 3, que tienen un grado de bioturbación alto. No se conservan, por ejemplo, las orientaciones originales de las lenticulas de yeso ni laminaciones varvadas yeso-carbonato (Rodríguez Aranda *et al.*, 1992). La distorsión de la fábrica original puede llegar a ser muy intensa, originándose una estructura altamente compleja en la cual, si han tenido lugar sucesivos procesos de bioturbación, los rasgos iniciales del sedimento evaporítico quedan parcial o totalmente modificados. Esta situación se ejemplifica en la litofacies mostrada en la figura 6A. La estructura fuertemente brechificada, formada por *nódulos* de diferente tamaño y distribución irregular, aparece como resultado de la bioturbación por raíces de un substrato calcáreo-yesífero no litificado en fases sucesivas. La relativa frecuencia de aparición de este tipo de litofacies subraya la importancia de las bioturbaciones en facies evaporíticas como las aquí descritas.

Al hilo de esta última idea, cabe destacar el uso de las icnitas como criterio de cronología relativa de procesos: relaciones geométricas (temporales) entre los distintos tipos de icnitas, crecimiento de cristales de yeso o glauberita diagenéticos tempranos anteriores, simultáneos o posteriores a la bioturbación, procesos de paleokarstificación anteriores o posteriores a bioturbación por vegetales, etc...

## Conclusiones

El registro sedimentario mioceno de la Cuenca de Madrid está en buena parte constituido por depósitos evaporíticos lacustres y aluviales asociados, dentro de

los cuales se reconocen diversos tipos de icnitas. El análisis sedimentológico de los complejos lacustres en que aparecen las icnitas permite diferenciar varias asociaciones de facies que corresponden a ambientes y/o subambientes de llanuras lutíticas, márgenes lacustres y ámbitos lacustres más abiertos. Dentro de estos últimos, se distingue entre facies características de lagos efímeros con periodos amplios de exposición subaérea y lagos más perennes.

Se ha diferenciado un total de seis tipos de icnitas en función del grado de bioturbación, geometría y morfología de las trazas, dimensiones, estructura interna y tipo de relleno, y facies a las que comúnmente se asocian las icnitas. Los agentes activos en la generación de estas icnitas son, por una parte, raíces de plantas (herbáceas o arbustos), tal y como se propone para el origen de las icnitas de tipo 1 y 2, y, por otra, insectos (larvas de *Chironomidae*, coleópteros, etc...) y anélidos. A estos animales se atribuye la formación de las icnitas de tipo 3, 4, 5 y, posiblemente, algunas del tipo 1. Por último, las pisadas de vertebrados, señaladas como icnitas de tipo 6, forman un grupo aparte por su morfología y organismos que las generan, atribuyéndose algunas de ellas a hiénidos de pequeño tamaño y otras a animales de mayor envergadura.

Cada uno de estos tipos de icnitas suele aparecer asociado a una o, en algunos casos, más de una facies sedimentaria evaporítica, sugiriéndose un modelo de distribución de las icnitas dentro de los depositivos deposicionales reconocidos.

Por último, se hace cierto hincapié en la relevancia de los efectos de la bioturbación, tanto sobre el control de dicha bioturbación en los procesos diagenéticos (reemplazamientos, cementaciones, etc...) que éstas presentan, como en su fábrica deposicional (hábito cristalino, presencia de pellets fecales, etc...).

Agradecemos profundamente a los Drs. J.P. Calvo, E. Sanz y A.M. Alonso Zarza sus sugerencias y apoyo en la elaboración de este trabajo. Del mismo modo, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a los doctores J. Morales y L. Alcalá por el estudio de las icnitas de vertebrados y a los doctores S. Ordóñez, M.A. García del Cura y J.M. Rouchy. Las discusiones mantenidas con C. Rossi han sido muy productivas; juntos hemos descubierto el sugestivo mundo de las trazas fósiles. También queremos expresar nuestra gratitud a los doctores J.C. García Ramos, M. Valenzuela y C. Suárez de Centi por la organización de la «Reunión Monográfica sobre Biosedimentación» de la S.G.E., que ha incentivado la realización de este trabajo. Un recuerdo especial a los doctores M. Dickman y D. Ralph. Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Proyecto PB-890032 PRY.

## Bibliografía

Alberdi, M.T., Hoyos, M., Junco, F., López Martínez, M., Morales, J., Sese, C. y Soria, D. (1984): Biostratigraphy and sedimentary evolution of continental Neogene in the Madrid area. *Paléobiologie Continental*, 14: 47-68.

- Alonso Zarza, A.M., Calvo, J.P. y García del Cura, M.A. (1992): Palustrine sedimentation and associated features - grainification and pseudo-microkarstification in the Middle Miocene (Intermediate Unit) of the Madrid Basin. *Sedim. Geol.*, 76: 43-61.
- Allen, P.A. y Collinson, J.D. (1986): Lakes. En: *Sedimentary environments and facies* (H.G. Reading, Ed.), 2ª Edic. Blackwell Scientific Publs., London: 63-94.
- Anadón, P. y Zamarreño, I. (1981): Paleogene nonmarine algal deposits of the Ebro Basin, Northeastern Spain. In: *Phanerozoic stromatolites* (C. Monty, Ed.), Springer-Verlag: 140-154.
- Armenteros, I. (1986): *Estratigrafía y sedimentología del Neógeno del sector suoriental de la Depresión del Duero*. Ed.: Dip. de Salamanca, Serie Castilla y León, 1: 471 p.
- Armenteros, I., Dabrio, C.J., Alonso Gavilán, G., Jorquera, A. y Villalobos, M. (1986): Laminación y bioturbación en carbonatos lagunares: Interpretación genética (Cuenca del Guadiana, Badajoz). *Estudios Geol.*, 42: 271-280.
- Arribas, J., Bustillo, M.A. y Díaz Molina, M. (1991): Chert in bioturbated sediments of sabkha paleoenvironment. *VI Flint Internac. Symp., Madrid Abstracts*: 29-33.
- Bauld, J. (1986): Benthic microbial communities of Australian saline lakes. En: *Limnology in Australia* (P. De Deckker y W.D. Williams, Eds.). CSIRO, Melbourne: 95-111.
- Brewer, R. (1964): *Fabric and mineral analysis of soils*. John Wiley & Sons Inc., London: 470 p.
- Burne, R.V., Bauld, J. y De Deckker, P. (1980): Saline lake Charophytes and their geological significance. *Jour. Sed. Petrol.*, 50: 281-293.
- Bustillo, M.A. (1976): Estudio petrológico de las rocas silíceas de la Cuenca del Tajo. *Estudios Geol.*, 32: 451-457.
- Bustillo, M.A. y Díaz Molina, M. (1980): Sílex tobáceos en el Mioceno Inferior continental (provincia de Cuenca). Un ejemplo de silicificaciones de paleosuelos en ambiente lago-playa. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Geol.)*, 78: 227-241.
- Calvet, F. (1975): Las rizocreaciones del Pleistoceno de Mallorca. *Rev. Inst. Invest. Geol. Univ. Barcelona*, 30: 35-60.
- Calvo, J.P., Ordóñez, S., García del Cura, M.A., Hoyos, M., Alonso Zarza, A.M., Sanz, E. y Rodríguez Aranda, J.P. (1989 a): Sedimentología de los complejos lacustres miocenos de la Cuenca de Madrid. En: *Sistemas Lacustres Cenozoicos en España* (P. Anadón y L.I. Cabrera, Eds.). *Acta Geol. Hispánica*, 24: 281-298.
- Calvo, J.P., Alonso Zarza, A.M. y García del Cura, M.A. (1989 b): Models of Miocene marginal lacustrine sedimentation in response to varied depositional regimes and source areas in the Madrid Basin (Central Spain). *Paleogeogr. Paleoclim. Paleocol.*, 70: 199-214.
- Calvo, J.P., Hoyos, M., Morales, J. y Ordóñez, S. (1990): Neogene stratigraphy, sedimentology and raw materials of the Madrid basin. *Paleont. i Evolució*, Mem. Esp., 2: 61-95.
- Calvo, J.P., De Vicente, G. y Alonso Zarza, A.M. (1991): Correlación entre las deformaciones alpinas y la evolución del relleno sedimentario de la Cuenca de Madrid durante el Mioceno. *I Congr. Grupo Español del Terciario*, Vic, Comunicaciones: 55-58.
- Cody, R.D. (1979): Lenticular gypsum: occurrences in nature and experimental determinations of effects of soluble green plant material on its formation. *Jour. Sed. Petrol.*, 49: 1015-1028.
- Cody, R.D. (1991): Organo-crystalline interactions in evaporite systems: the effects of crystallization inhibition. *Jour. Sed. Petrol.*, 61: 704-718.
- Cody, R.D. y Cody, A.M. (1988): Gypsum nucleation and crystal morphology in analog saline terrestrial environments. *Jour. Sed. Petrol.*, 58: 247-255.
- Cody, R.D. y Hull, A.B. (1980): Experimental growth of primary anhydrite at low temperatures and water salinities. *Geology*, 8: 505-509.
- Corrochano, A. y Armenteros, I. (1989): Los sistemas lacustres de la Cuenca Terciaria del Duero. En: *Sistemas Lacustres Cenozoicos en España* (P. Anadón y L.I. Cabrera, Eds.). *Acta Geol. Hispánica*, 24: 259-279.
- Chamberlain, C.K. (1975): Recent lebensspuren in non marine aquatic environments. En: *The study of trace fossils* (R.W. Frey, Ed.). Springer-Verlag, Berlin: 431-458.
- D'Alessandro, A. y Bromley, R.G. (1987): Meniscate trace fossils and the *Muensteria-Taenidium* problem. *Paleontology*, 30: 743-763.
- De Deckker, P. (1988): Biological and sedimentary facies of Australian salt lakes. *Paleogeogr. Paleoclim. Paleocol.*, 62: 237-270.
- Evenary, M., Gutterman, Y. y Gavish, E. (1985): Botanical studies on coastal salinas and sabkhas of the Sinai. En: *Hypersaline ecosystems. The Gavish Sabkha* (G.M. Friedman y W.E. Krumbein, Eds.). Springer-Verlag, Berlin: 145-182.
- Eugster, H.P. y Kelts, K. (1983): Lacustrine chemical sediments. In: *Chemical sediments and Geomorphology* (A.S. Goudie y K. Pye, Eds.). Academic Press, London: 321-368.
- Fisher, J.B. (1982): Effects of macrobenthos on the chemical diagenesis of freshwater sediments. In: *Animal-sediment relations* (P.L. Mc Call y M.J.S. Tevesz, Eds.) Plenum Press, New-York: 177-217.
- Frey, R.W. y Pemberton, S.G. (1984): Trace fossils. Facies Models. In: *Facies Models* (R.G. Walker, Ed.) *Geoscience Canada, Reprint Series*, 1: 189-207.
- Freytet, P. y Plaziat, J.C. (1982): Continental carbonate sedimentation and pedogenesis. Late Cretaceous and Early Tertiary of Southern France. *Contribution to Sedim., Schweizebart*, Stuttgart: 213 p.
- Friedman, G.M. y Krumbein, W.E. (Eds.) (1985): *Hypersaline ecosystems. The Gavish Sabkha*. Springer-Verlag, Berlin: 484 p.
- Friedman, G.M. y Sanders, J.E. (Eds.) (1978): *Principles of Sedimentology*. John Wiley & Sons Inc., New-York: 792 p.
- Fort, R., Calvo, J.P. y Ordóñez, S. (1982): Contribución al conocimiento de la geología del borde oriental de la Cuenca de Madrid (sector Pastrana-Illana). *Tecniterrae*, 296: 23-40.
- García del Cura, M.A. (1979): Las sales sódicas, calco-sódicas y magnésicas de la Cuenca del Tajo. *Serie Universitaria, Fundación Juan Mach*, 109: 93 p.
- García Ramos, J.C., Valenzuela, M. y Suarez de Centi, C. (1989): Sedimentología de las huellas de actividad orgánica. En: *Sedimentología* (A. Arche, Coord.) *C.S.I.C. Nuevas Tendencias*, Vol. 2: 261-342.
- Gerdes, G., Spira, J. y Dimentman, Ch. (1985 a): The fauna of the Gavish Sabkha and the Solar Lake - a comparative study. En: *Hypersaline ecosystems. The Gavish Sabkha* (G.M. Friedman y W.E. Krumbein, Eds.) Springer-Verlag, Berlin: 322-345.
- Gerdes, G., Krumbein, W.E. y Holtkamp, E. (1985 b): Salinity and water activity related zonation of microbial communities and potential stromatolites of the Gavish Sabkha. En: *Hypersaline ecosystems. The Gavish Sabkha* (G.M. Friedman y W.E. Krumbein, Eds.) Springer-Verlag,

- Berlin: 238-266.
- Gierlowski-Kordesch, E. (1991): Ichnology of an ephemeral lacustrine/alluvial plain system: Jurassic East Berlin Formation, Harford Basin, USA. *Ichnos*, 1: 221-232.
- Glennie, K.W. y Evamy, B.D. (1968): Dikaka: plants and plant-root structures associated with aeolian sand. *Pal. Pal. Pal.*, 4: 77-87.
- Gunatilaka, A., Saleh, A. y Al-Temeemi, A. (1980): Plant-controlled supratidal anhydrite from Al-Khiram, Kuwait. *Nature*, 288: 257-260.
- Hardie, L., Smoot, J.P. y Eugster, H.P. (1978): Saline lakes and their deposits: a sedimentological approach. En: *Modern and ancient lake sediments* (A.Matter y M.Tucker, Eds.), *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, 2: 7-41.
- Hsü, K.J. y Siegenthaler, C. (1969): Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomitic problem. *Sedimentology*, 12: 11-25.
- Jones, B. (1988): The influence of plants and micro-organisms on diagenesis in caliche: example from the Pleistocene, Ironshore Formation on Cayman Brac, British West Indies. *Bull. Canadian Petrol. Geol.*, 36: 191-201.
- Klappa, C.F. (1980): Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance. *Sedimentology*, 27: 613-629.
- Mc Call, P.L. y Tevesz, M.J.S. (1982 a): The effects of benthos on physical properties of freshwater sediments. En: *Animal-sediment relations* (P.L. Mc Call y M.J.S. Tevesz, Eds.) *Plenum Press*, New-York: 105-176.
- Mc Call, P.L. y Tevesz, M.J.S. (Eds.) (1982 b): *Animal-sediment relations (The biogenic alteration of sediments)*. Plenum press. New-York: 336 p.
- Oliver, D.R. (1971): Life history of the *Chironomidae*. *Annu. Rev. Entomol.*, 16: 211-230.
- Ordóñez, S., Calvo, J.P., García del Cura, M.A., Alonso Zarza, A.M. y Hoyos, M. (1991): Sedimentology of sodium sulphate and special clays from the Tertiary of the Madrid Basin (Spain). En: *Lacustrine facies analysis* (P. Anadón, L.I. Cabrera y K. Kelts Eds.). *Int. Ass. Sedim. Spec. Publ.*, 13: 39-55.
- Paterson, C.G. y Walker, K.F. (1974): Recent history of *Tanytarsus barbicansis* Freeman (*Diptera: Chironomidae*) in the sediments of a shallow, saline lake. *Aust. Jour. Mar. Freshwater Resour.*, 25: 315-325.
- Pueyo, J.J. (1991): Depósitos evaporíticos actuales del litoral Mediterráneo de la Península Ibérica. En: *Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos* (J.J. Pueyo, Coord.). Publ. Univ. Barcelona: 136-147.
- Retallack, G.J. (1990): *Soils of the past. An Introduction to Paleopedology*. Unwin Hyman, Boston: 520 p.
- Rodríguez Aranda, J.P. (1992): Significado de bioturbaciones en un medio evaporítico continental (Mioceno de la Cuenca de Madrid). *Geogaceta*, 12: 113-115.
- Rodríguez Aranda, J.P., Calvo, J.P. y Ordóñez, S. (1991): Transición de abanicos aluviales a evaporitas en el Mioceno del borde oriental de la Cuenca de Madrid (Sector Barajas de Melo-Illana). *Rev. Soc. Geol. España*, 4: 33-50.
- Rodríguez Aranda, J.P., Calvo, J.P. y Ordóñez, S. (1992): Tipología de facies yesíferas en el Mioceno de la zona oriental de la Cuenca de Madrid. *III Congr. Geol. España y VIII Latinoamericano*, Salamanca, Tom. 1 Actas: 196-200.
- Rouchy, J.M., Bernet-Rollande, M.C. y Maurin, A.F. (1986): Pétrographie descriptive des évaporites: applications sur le terrain en subsurface et au laboratoire. In: *Les séries à évaporites en exploration pétrolière*. Tome 1: *Méthodes géologiques*. Ed. Technip, Paris: 73-121.
- Salvany, J.M. (1989): Aspectos petrológicos y sedimentológicos de los yesos de Alicos y Monteagudo (Navarra): Mioceno de la Cuenca del Ebro. *Turiaso*, 9: 121-146.
- Sanz, E., Rodríguez Aranda, J.P., Calvo, J.P. y Ordóñez, S. (1991): Sedimentología de las facies de yesos detríticos de la Unidad Intermedia del Mioceno (Sector Sur de la Cuenca de Madrid). *I Congr. Grupo Español Terciario*, Vic, Comunicaciones: 316-319.
- Sanz, E., Rodríguez Aranda, J.P., Calvo, J.P. y Ordóñez, S. (1994): Tertiary detrital gypsum in the Madrid Basin. Criteria for interpreting detrital gypsum in continental evaporitic sequences. *SEPM Spec. Publ.*, vol. 50.
- Smith, N.D. y Hein, F.J. (1971): Biogenic reworking of fluvial sediments by Staphylinid beetles. *Jour. Sed. Petrol.*, 41: 598-602.
- Stoops, G. e Ilaiwi, M. (1981): Gypsum in arid soils. Morphology and Genesis. *Proceedings III Internac. Soil Classific. Workshop*, ACSAD, Damasco: 175-185.
- Tevesz, M.J.S. y Mc Call, P.L. (1982): Geological significance of aquatic nonmarine trace fossils. En: *Animal-sediment relations* (P.L. Mc Call y M.J.S. Tevesz, Eds.) *Plenum Press*, New-York: 257-285.
- Truc, G. (1978): Lacustrine sedimentation in an evaporitic environment: the Ludian (Palaeogene) of the Mormoiron basin, southeastern France. En: *Modern and ancient lake sediments* (A.Matter y M.Tucker, eds.), *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, 2: 189-203.
- Truc, G. (1980): Evaporites in a subsident continental basin (Ludian and Stampian of Mormoiron-Pernes in Southeastern France). Sequential aspects of deposition primary facies and their diagenetic evolution. En: *Evaporite deposits*. Ed. Technip. Paris: 234-259.
- Warren, J.K., Havholm, K.G., Rosen, M.R. y Parsley, M.J. (1990): Evolution of gypsum karst in the Kirschberg Evaporite Member near Fredericksburg, Texas. *Jour. Sed. Petrol.*, 60: 721-734.
- West, I.M., Ali, Y.A. y Hilmy, M.E. (1979): Primary gypsum nodules in a modern sabkha on the Mediterranean coast of Egypt. *Geology*, 7: 354-358.
- Williams, W.D., Boulton, A.J. y Taaffe, R.G. (1990): Salinity as a determinant of salt lake fauna: a question of scale. *Hydrobiologia*, 197: 257-266.
- Wright, V.P. (1989): Geomorphic and stratigraphic relations of alluvial soils: a guide for interpreting ancient paleosol-bearing sequences. En: *Paleosols in siliciclastic sequences*. PRIS. Univ. Reading, Reino Unido: 26-48.

Manuscrito recibido el 10 de Mayo de 1992

Aceptado el manuscrito revisado el 10 de Julio de 1992