

UNIDADES GLAUBERÍTICAS DEL TERCIARIO IBÉRICO: NUEVAS APORTACIONES

F. Ortí

Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Universitat de Barcelona, Zona Universitària de Pedralbes, 08071 Barcelona (e-mail: orti@natura.geo.ub.es)

Resumen: Las formaciones evaporíticas que ocuparon las grandes cuencas continentales de la Península Ibérica durante el Terciario tienen frecuentemente unidades glauberíticas (con sulfatos sódicos) en sus partes centrales. El presente trabajo ofrece un visión general de estas unidades (minerales, cinturones de facies, litofacies y texturas de la glauberita, secuencias elementales), discute los posibles procesos de precipitación de la glauberita y el tipo químico de la salmuera, y propone un modelo interpretativo de lago salino glauberítico para dichas unidades. Se incorpora a esta síntesis algunas observaciones en unidades similares presentes en el Terciario de la zona central de Anatolia.

Palabras clave: glauberita, evaporitas, sedimentología, diagénesis, Terciario, Península Ibérica

Abstract: The evaporitic formations accumulated in the large non-marine sedimentary basins of the Iberian Peninsula during the Tertiary commonly have glauberitic units (units bearing sodium sulphates) in their central parts. This paper offers a general view of these units (minerals, facies belts, lithofacies and textures of the glauberite, depositional sequences), discusses the possible processes of glauberite precipitation and the brine types, and proposes a model of (saline) glauberitic lake for these units. This overview also incorporates some of the author's observations made on similar Tertiary units in central Anatolia.

Key words: glauberite, evaporites, sedimentology, diagenesis, Tertiary, Iberian Peninsula

Ortí, F. (2000): Unidades glauberíticas del Terciario ibérico: nuevas aportaciones. *Rev. Soc. Geol. España*, 13 (2): 227-249

En los últimos años se asiste a una progresiva identificación de unidades con minerales de sulfato sódico intercaladas en el seno de las grandes formaciones evaporíticas que ocupan los centros de las cuencas terciarias de la Península Ibérica. El presente trabajo utiliza el término "unidades glauberíticas" para referirse, en sentido amplio, a los núcleos de las citadas formaciones centrales que están dominados por alguno o algunos de los principales minerales de sulfato sódico, como son glauberita, thenardita y mirabilita, acompañando a los sulfatos cálcicos y, en ocasiones, también al cloruro sódico (Tabla I). De todos estos sulfatos con sodio, la glauberita es el mineral omnipresente y, sin duda, también el más abundante. En general, estas unidades tienen carácter de yacimiento, y diversos trabajos han puesto de manifiesto su importancia económica (Ordóñez *et al.*, 1982; Ordóñez *et al.*, 1991; Ordóñez y García del Cura, 1992). A los yacimientos, ya previamente conocidos, de thenardita-glauberita de la Cuenca del Tajo (sector occidental o Cuenca de Madrid) y de glauberita de los sectores riojano (Alcanadre) y burgalés (Cerezo de Río Tirón, Belorado) de la Cuenca del Ebro, cabe hoy añadir la presencia de unidades glauberíticas en otras formaciones terciarias ibéricas. Así, en

la propia Cuenca del Ebro se conocen intercalaciones de glauberita en el sondeo de Marcilla (Salvany, 1989), así como potentes capas de glauberita en el subsuelo de la zona entre Remolinos y Zaragoza (Fernández-Nieto

CARBONATOS

Calcita, CaCO_3
Dolomita, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Magnesita, MgCO_3

SULFATOS

Yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Anhidrita, CaSO_4
Glauberita, $\text{CaNa}_2(\text{SO}_4)_2$
Mirabilita, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Thenardita, Na_2SO_4
Hidroglauberita, $\text{CaSO}_4 \cdot 1,6\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$
Bloedita, $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Polihalita, $\text{K}_2\text{MgCa}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

CLORUROS

Halita, NaCl
Carnalita, $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Bischofita, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Kainita, $\text{K}_4\text{Mg}_4\text{Cl}_4(\text{SO}_4)_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$

Tabla I.- Minerales evaporíticos citados en el texto.

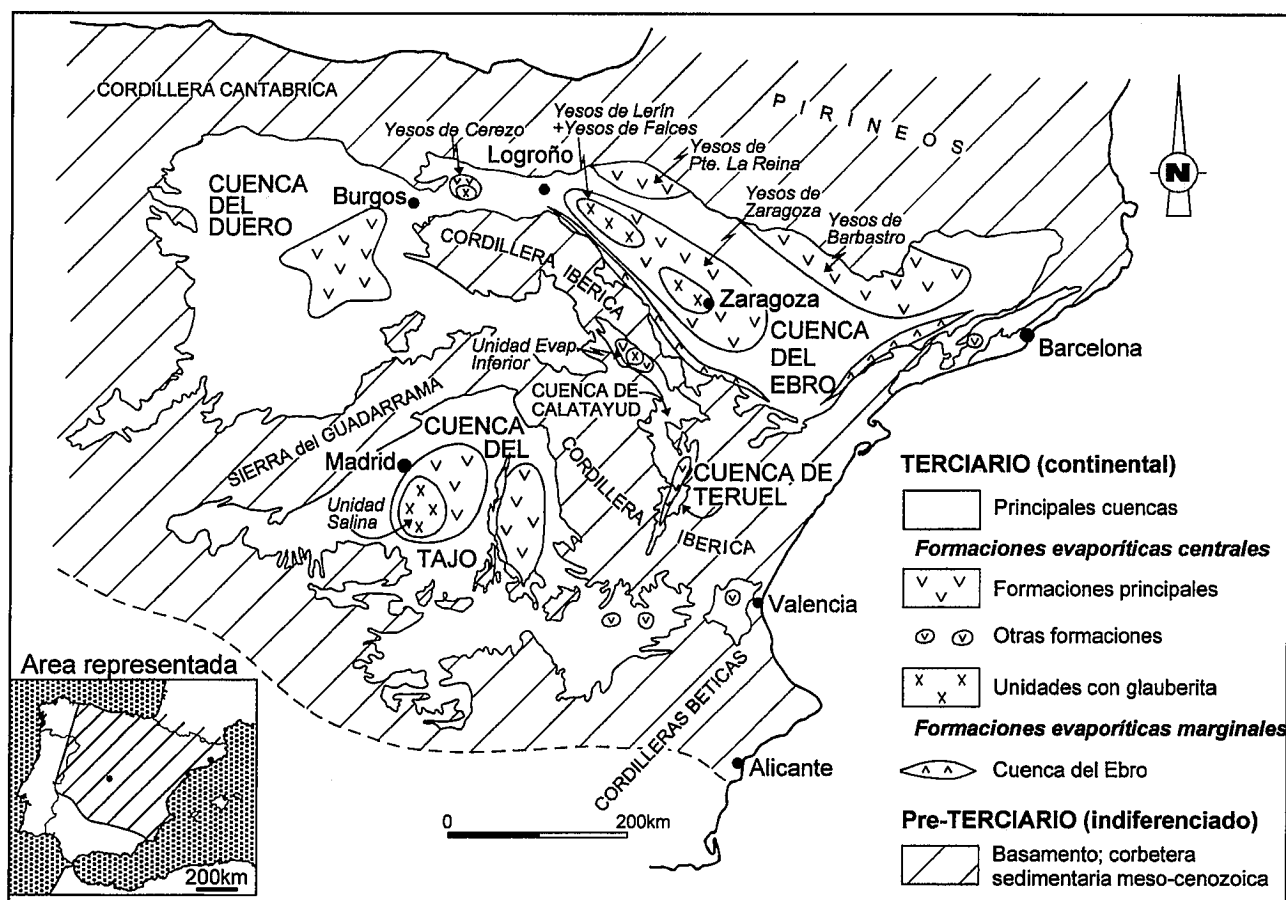


Figura 1.- Situación de las principales formaciones evaporíticas continentales de edad terciaria en la mitad septentrional de la Península Ibérica, con distinción de aquéllas que tienen unidades glauberíticas en sus centros (modificado de Ortí y Salvany, 1991, fig. 1).

y Galán, 1979; García-Veigas *et al.*, 1994), con capas de thenardita de desarrollo local en el subsuelo de Utebo (Mandado, 1987). En la Cuenca de Calatayud también se ha citado una unidad glauberítica que presenta localmente capas de thenardita (Ortí y Rosell, 1994, 2000).

Descubrimientos similares, aunque mucho más recientes, se están realizando en varias cuencas terciarias de la Península de Anatolia (Turquía), en el otro extremo del Mediterráneo. Así, en la Cuenca de Beypazari, se inició hacia principios de los años noventa la explotación del yacimiento de glauberita-thenardita próximo a la ciudad de Çayirhan (Ortí y Helvacı, 1995). La extracción de thenardita en la mina de Çayirhan se suma a la principal producción de sulfato sódico en Turquía obtenida a partir de las salmueras sulfatado-sódicas del lago Açı, y de otros lagos menores, como el Bollük (Gündogan y Helvacı, 1996). Igualmente, nuestras observaciones en diversas unidades de yeso secundario en las cuencas de Çorum-Çankari (Anatolia central) indican que dichas unidades yesíferas provienen de la transformación de glauberita en superficie.

Una primera síntesis sobre los depósitos glauberíticos en España fue presentada en Ortí y Salvany (1991). El presente trabajo no pretende una actualización completa de esta compleja temática, y tan sólo plantea algunas reflexiones sobre los puntos de mayor interés en

relación con la caracterización y génesis de estas unidades. Algunas de nuestras observaciones realizadas en las cuencas terciarias de Anatolia ayudarán a comprender mejor diversos aspectos de las unidades ibéricas.

Características de las formaciones evaporíticas

Tipología de las formaciones evaporíticas

En el Terciario continental peninsular existen dos tipos principales de formaciones evaporíticas centrales, una de muy baja salinidad, que contiene únicamente sulfato cálcico, y otra de alta salinidad que contiene, además, sulfato sódico y/o cloruro sódico. En relación con la distribución de estas formaciones en las cuencas, se distingue al menos tres tipos principales de cuencas continentales (Fig. 1): 1) cuencas que contienen sólo formaciones con sulfato cálcico (cuencas del Duero, Teruel, Cabriel y el sector oriental de la Cuenca del Tajo o Depresión Intermedia); 2) cuencas que contienen una sola formación evaporítica central con núcleo de unidad glauberítica (cuencas del Tajo y de Calatayud); y 3) la Cuenca del Ebro, que presenta una gran diversidad de estas formaciones, muchas de las cuales incluyen unidades glauberíticas en sus núcleos.

En las cuencas del primer tipo suelen dominar las facies de yeso laminado en el centro de las formaciones evaporíticas, y las de yeso bioturbado con nódulos de sílex en

CUENCA	Unidad evaporítica	Carbonatos		Sulfatos Na,Ca			facies de cloruros	
		D	Mg	An	Gb	Th	H	Ph
EBRO	Yesos de Cerezo							
	Yesos de Falces							
	Yesos de Zaragoza (zona Remolinos)							
	Yesos de Zaragoza (zona Utebo)	?	?					
	Yesos de Lerín							
TAJO	Unidad Salina							
CALATAYUD	Unid. Evapor. Inferior							
BEYPAZARI	Miembro Evaporítico							

Figura 2.- Minerales evaporíticos principales de las unidades glauberíticas consideradas en el presente trabajo. Minerales: D: dolomita; Mg: magnesita; An: anhidrita; Gb: glauberita; Th: thenardita; H: halita; Ph: polihalita. Fuentes: Ortí *et al.* (1979), García del Cura *et al.* (1979), Ortí y Pueyo (1980), Menduñía *et al.* (1984), Mandado (1987), Salvany (1989), García-Veigas *et al.* (1994), Ortí y Helvacı (1995), Ortí y Rosell (1998), Ortí y Rosell (2000).

la periferia. La facies de yeso bioturbado, que ha sido caracterizada en varios trabajos (Salvany *et al.*, 1994; Anadón *et al.*, 1997; Rodríguez Aranda y Calvo, 1998), puede también extenderse hacia el centro de las formaciones (Depresión Intermedia). En las cuencas del segundo tipo, la unidad glauberítica del núcleo se rodea también de una aureola de sulfato cálcico. Finalmente, la Cuenca del Ebro tiene la particularidad de destacar cinturones marginales de pequeñas formaciones evaporíticas con sólo sulfato cálcico, respecto de las grandes formaciones evaporíticas centrales, que suelen presentar unidades glauberíticas en sus núcleos (Ortí *et al.*, 1989). Una excepción a esta tendencia la constituye el conjunto integrado por los Yesos de Puente La Reina y Los Yesos de Barbastro, del cual sólo se conoce halita y anhidrita en profundidad (Ortí, 1997).

Las unidades glauberíticas peninsulares objeto del presente estudio pertenecen a las siguientes formaciones (Fig. 1): Yesos de Cerezo (Mioceno superior), Formación Yesos de Zaragoza (Mioceno inferior), Formación Yesos de Lerín (Mioceno basal) y Formación Yesos de Falces (Oligoceno), en la Cuenca del Ebro; Unidad evaporítica inferior (Mioceno inferior), en la Cuenca de Calatayud; y Unidad Salina (Mioceno inferior), en la Cuenca del Tajo. A fines comparativos se incluye también el Miembro Evaporítico de la Formación Kirmir (Mioceno superior) en la Cuenca de Beypazari (Turquía), y se hará alguna breve referencia a las unidades glauberíticas de otras cuencas terciarias de Anatolia central (cuencas Çorum-Çankari).

Mineralogía evaporítica y cinturones de facies

La distribución de los minerales evaporíticos principales en estas unidades glauberíticas se ofrece en la fi-

gura 2. En ella se omite los minerales de alteración (calcita, hidroglauberita y mirabilita, entre otros) y de las eflorescencias de superficie (muchos de ellos sulfatos). Igualmente se omite el yeso, que se presenta en las unidades glauberíticas ibéricas siempre como yeso secundario proveniente de diversos precursores (anhidrita nodular; glauberita; yeso primario laminado que, a su vez, se ha transformado previamente en anhidrita). Como "facies de cloruros" se incluye la polihalita por ser un sulfato que se encuentra asociado a la halita en el caso de las unidades ibéricas. Aparte de polihalita, no se ha detectado otros sulfatos con magnesio en las unidades glauberíticas terciarias, exceptuando algunas citas de bloedita en la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo que podrían corresponder a muestras de materiales alterados cerca de la superficie (Ordóñez *et al.*, 1982; Ordóñez y García del Cura, 1992).

Una síntesis muy simplificada de los principales cinturones de facies que presentan las formaciones evaporíticas terciarias arriba mencionadas se ofrece en la figura 3. Esta figura muestra, además del caso de la Cuenca de Beypazari (Turquía), ejemplos de los tres tipos de cuenca ibéricas que se ha distinguido anteriormente. Las del tipo 1 están representadas por los Yesos de Cascante-Libros, en la Cuenca de Teruel. En relación con las unidades glauberíticas de las cuencas de los tipos 2 y 3, algunas unidades presentan sólo *glauberita* (con cantidades variables de anhidrita), como los Yesos de Cerezo en la Cuenca del Ebro. Otras presentan *glauberita* y *thenardita*, como el Miembro Evaporítico de la Cuenca de Beypazari o la Unidad evaporítica inferior de la Cuenca de Calatayud. Otras unidades presentan *glauberita* y *halita*, ya sea sin polihalita, como

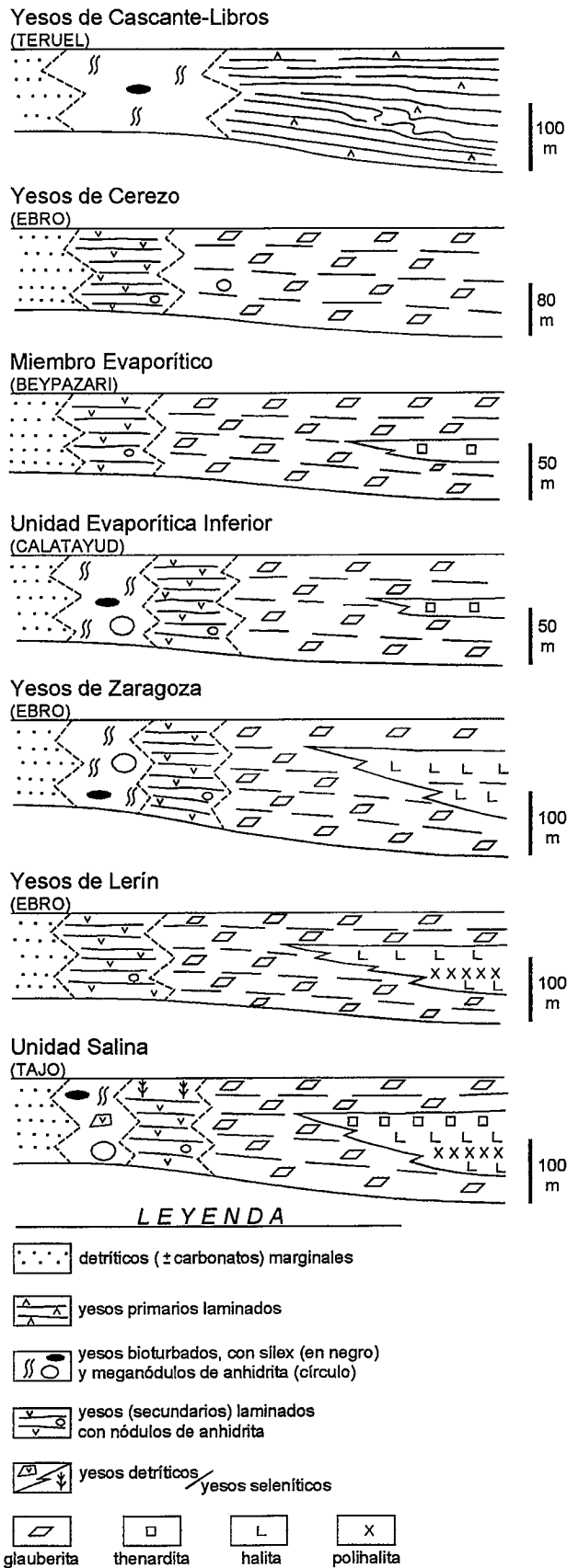


Figura 3.- Esquema de los cinturones de facies presentes en las formaciones evaporíticas continentales del Terciario consideradas en este trabajo. El desarrollo de los cinturones externos es variable, y algunas facies pueden estar desarrolladas sólo localmente. Las escalas son orientativas. Para cada formación se indica, entre paréntesis, la cuenca correspondiente. Excepto para los Yesos de Cascante-Libros, el resto de formaciones evaporíticas tiene unidades glauberíticas centrales.

los Yesos de Zaragoza en la Cuenca del Ebro, o con polihalita, como los Yesos de Lerín en la Cuenca del Ebro y la Unidad Salina (subunidad inferior; Ordóñez y García del Cura, 1992) de la Cuenca del Tajo. En esta última cuenca, además, se presentan glauberita y thenardita, en ausencia de halita, al techo de la Unidad Salina (subunidad superior; Ordóñez y García del Cura, 1992). Cinturones de facies detallados han sido establecidos para las unidades glauberíticas de los Yesos de Lerín en la Cuenca del Ebro (Salvany y Ortí, 1994) y la Unidad evaporítica inferior en la Cuenca de Calatayud (Ortí y Rosell, 1998, 2000). Los datos isotópicos de los sulfatos cálcicos de las diferentes formaciones del Terciario continental en la Cuenca del Ebro indican que el ión sulfato proviene, principalmente, del reciclado de sales triásicas (Utrilla *et al.*, 1991, 1992). Para las formaciones evaporíticas de la Cuenca del Tajo (sectores tanto occidental como oriental) los mismos datos indican el reciclado de sulfatos del Triásico, Cretácico superior y Paleógeno (Ordóñez y García del Cura, 1992; Utrilla *et al.*, 1992).

Litofacies y texturas cristalinas de la glauberita

Los resultados de estudios petrográficos y de litofacies de la glauberita en algunas unidades glauberíticas del Terciario ibérico han sido resumidos en diversos trabajos (Ortí *et al.*, 1979, fig. 17; Ortí y Rosell, 1991, fig. 5; Ordóñez y García del Cura, 1994, tabla 2; Ortí y Rosell, 1997, fig. 4). A continuación, se completan estos estudios con lo más relevante de nuestra últimas observaciones.

En el conjunto de las unidades estudiadas, las *litofacies de la glauberita* son muy variadas, pudiendo agruparse en estos tipos principales: 1) laminadas, bandeadas, y bandeadas tabulares (planoparalelas); 2) nodulares, y bandeadas nodulares; 3) en capas enterolíticas; 4) microcristalinas, desde masivas a laminadas (con frecuencia de tonos oscuros); 5) masivas macrocristalinas sin matriz encajante; (6) masivas macrocristalinas con matriz (intersticiales); en éstas, los cristales se agrupan en masas desde muy irregulares hasta tendentes a la morfología de roseta; y 7) rosetas sueltas y capas de rosetas. Además de estas litofacies, se presenta glauberita masiva cementante (del material encajante) y, más raramente, como venas fibrosas. Asociadas a varias de las anteriores litofacies glauberíticas, se desarrollan diversas *estructuras de deformación* plástica, compactación y estiramiento, así como morfologías de aspecto fluidificado, flamígero o deshilachado, que se acompañan de reorientación de los macrocristales. Estas estructuras de deformación están presentes en todas las unidades estudiadas.

Las *texturas cristalinas* que integran todas estas litofacies son también muy variadas, con tamaños desde muy finos (microcristales de < 30 µm, o “matriz glauberítica”) hasta relativamente gruesos (cristales macroscópicos que alcanzan los 5-10 cm). Son frecuentes la heterometría y la bimodalidad cristalinas. Los hábitos cristalinos varían

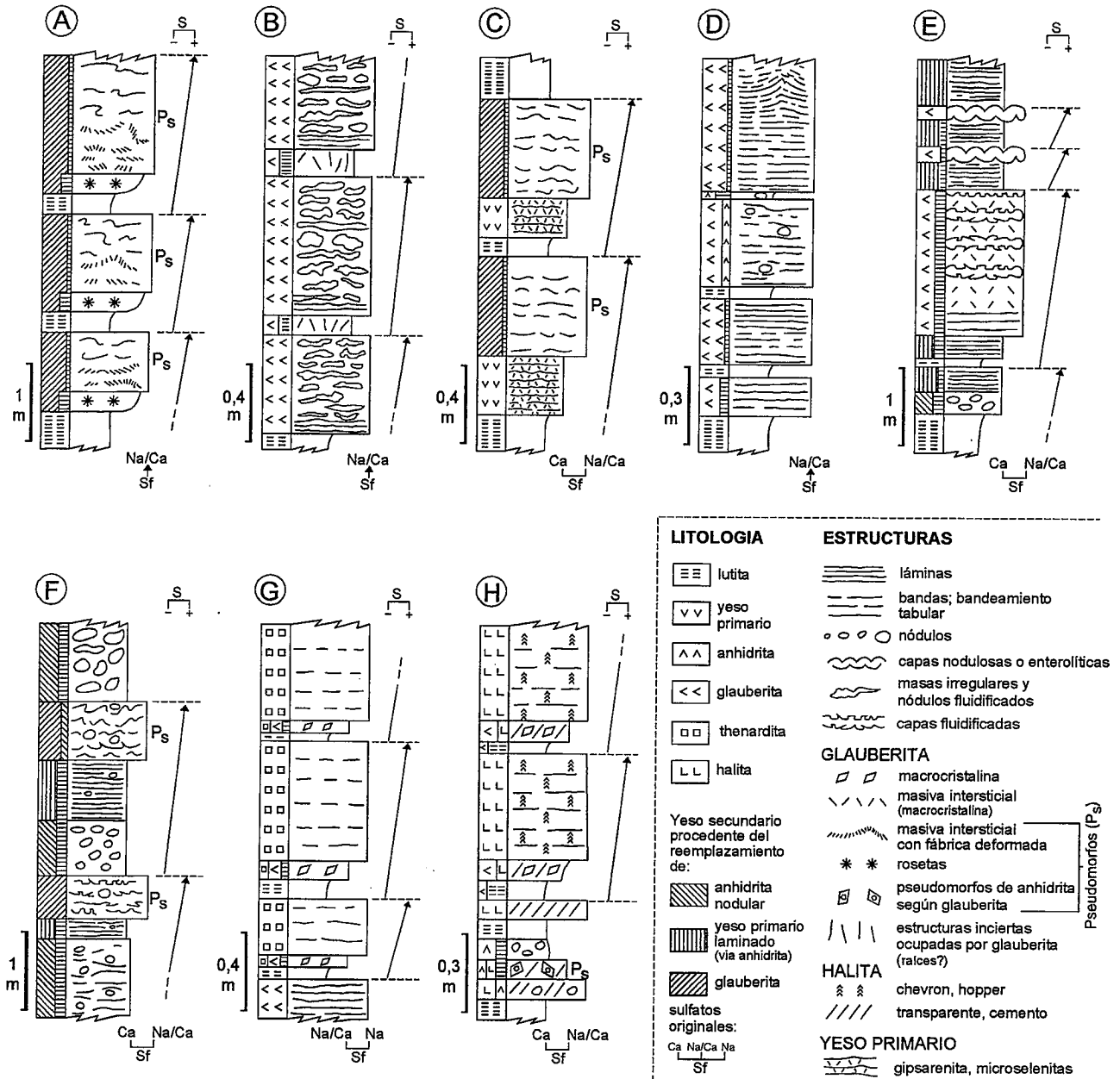


Figura 4.- Alternancias o ciclos elementales presentes en las unidades glauberíticas consideradas en este trabajo. Localidades: A): Añover de Tajo (Unidad Salina, Cuenca del Tajo). B): Mina Consuelo (Unidad Salina, Cuenca del Tajo). C): cuencas Çorum-Çankari (Anatolia central). D): Cerezo de Río Tirón (Yesos de Cerezo, Cuenca del Ebro). E): Ermita de Aradón, Alcanadre (Yesos de Lerín, Cuenca del Ebro). F): autovía de Aragón en Calatayud (Unidad evaporítica inferior, Cuenca de Calatayud). G): mina de Çayirhan (Miembro Evaporítico, Cuenca de Beypazari). H): sondeo de PURASAL, mina de Remolinos (Yesos de Zaragoza, Cuenca del Ebro). S: salinidad; Sf: sulfatos interpretados como originales; Ca: yeso/anhidrita; Na-Ca: glauberita; Na: mirabilita/thenardita.

ampliamente entre euhedrales y anhedrales, y los cristales pueden ser desde transparentes a muy opacos por contener inclusiones sólidas de la matriz encajante. En general, no se presentan inclusiones fluidas en los cristales; no obstante, García-Veigas *et al.* (1994) citan la presencia de inclusiones fluidas primarias de <10 µm en la unidad glauberítica de los Yesos de Zaragoza. Como inclusiones de otros minerales evaporíticos, la presencia más significativa es la de cristales de anhidrita.

En las *texturas euhedrales*, los cristales varían desde prismáticos (monoclínicos) con secciones típica-

mente romboidales, a tabulares y lenticulares. Todos ellos pueden tener zonación de crecimiento y sobrecrecimientos sintaxiales, estos últimos desde euhedrales a fuertemente anhedrales. Los cristales euhedrales, así como sus sobrecrecimientos sintaxiales, pueden estar compactados, con interpenetración y reorientación cristalina. Menos frecuentemente, los cristales se organizan con granoclasificación, ya sea directa o inversa. Raramente se aprecian texturas detríticas. La orientación de los cristales es muy variada, desde desorientada hasta paralela a la estratificación, e incluso alineada o

con tendencia fluidal. Sólo ocasionalmente adquieren los cristales una fábrica en empalizada (subvertical). En los nódulos, capas enterolíticas y láminas con deformación, puede aumentar el tamaño cristalino desde el centro hasta el exterior, disponiéndose los cristales mayores perpendicularmente a los bordes externos de las litofacies glauberíticas, y proyectándose contra la matriz. El crecimiento de estos cristales externos parece ser sincrónico con la deformación.

En las *texturas anhedrales*, los cristales presentan morfologías desde poligonales y en mosaico, hasta ameboides, ramosas, fasciculadas, dendríticas y en placas irregulares, alcanzando estas últimas tamaños de orden centimétrico. Las extinciones ópticas de todas estas texturas pueden ser irregulares y muy ondulantes. Los sobrecrecimientos sintaxiales anhedrales, así como los diversos tipos de cristales anhedrales, pueden englobar poiquilíticamente a la matriz encajante, aunque también pueden desplazarla; todos ellos corresponden, en general, a la tipología de cementos glauberíticos. Las texturas anhedrales poligonales o en mosaico pueden ser tanto cementos glauberíticos, como reemplazamientos sobre anhidrita u otros sulfatos (polihalita) e incluso halita. En este último caso, cabe hablar de *glauberita secundaria*; algunas de estas texturas son porfiroblásticas, ya sea como cristales individuales o como agregados policristalinos, y presentan inclusiones relictas del mineral reemplazado.

Más raramente, las texturas glauberíticas presentan: a) agregados cristalinos integrados por subcristales con disposición en abanico o fasciculada, y con extremos más o menos curvados; b) placas del tipo *raft* (fragmentos de posibles películas finas formadas en la interfase aire-agua); c) finas láminas de cristales transparentes cuya textura evoluciona en la vertical desde euhedral y en empalizada, a anhedral y poligonal; d) láminas con granoclasificación directa integradas totalmente por cristales llenos de inclusiones sólidas, es decir, cristales que han crecido en posición intersticial; y e) cristales de glauberita elongados. Aunque en los ambientes actuales se ha citado pseudomorfo de glauberita según mirabilita (Smoot y Lowenstein, 1991, fig. 3.14), este hecho es poco conocido en las formaciones antiguas.

Diversos trabajos han puesto de manifiesto que el *yeso secundario procedente de la transformación de la glauberita* presenta unas texturas propias (texturas alabastrinas con valor diagnóstico), las cuales se diferencian claramente de las que presenta el yeso secundario que procede de la hidratación de la anhidrita (Menduiña *et al.*, 1984; Ortí *et al.*, 1995). Esta observación petrográfica, junto con el reconocimiento de los pseudomorfo de glauberita (precursora) macroscópica, y de las litofacies características de este mineral arriba citadas, permiten una rápida identificación de estas variedades de yeso secundario en los afloramientos.

Alternancias deposicionales y ciclos elementales

Algunas de las principales alternancias y ciclos elementales con participación de glauberita que hemos

podido documentar en las unidades estudiadas quedan reflejadas en la figura 4. Para la caracterización de todas estas secuencias, esta figura recurre a mostrar la traza idealizada de la salinidad (tendencia creciente), la cual suele asociarse a una tendencia de somerización.

Alternancias entre diversas litofacies glauberíticas

En las unidades estudiadas se observa con frecuencia la alternancia de ciertas litofacies glauberíticas. Dos ejemplos son, en la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo, los cortes de Añover de Tajo (Fig. 4A) y de Mina Consuelo, esta última al NE de San Martín de la Vega (Fig. 4B). En el primer caso dominan las litofacies masivas macrocristalinas con matriz (intersticiales), aunque todo el conjunto, que muestra una marcada ritmicidad, se presenta como pseudomórfico (yeso secundario según glauberita). En el segundo caso, las litofacies bandeadas más o menos tabulares presentes en la base de las capas de glauberita dan paso a unas litofacies nodulares afectadas por estructuras de deformación y estiramiento; en los tramos lutíticos que separan las capas de glauberita, ciertas estructuras subverticales, ahora rodeadas por glauberita, podrían reflejar procesos edáficos (¿raíces de plantas?). Observaciones sobre esta secuencia fueron hechas en García del Cura *et al.* (1992). Todas estas características sugieren una secuencia de somerización y débil profundidad de agua. Secuencias de somerización similares se presentan en Mina Vicente (al E de Ciempozuelos).

Alternancias entre glauberita y carbonato

La magnesita es el mineral carbonatado más significativo de los que acompañan a la glauberita, como se deduce de la frecuente asociación glauberita-magnesita/lutita en varias unidades (Fig. 2). Alternancias entre laminaciones de magnesita (milimétricas) y de glauberita (entre 3 y 15 mm) han sido citadas en muestras de sondeo en la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo (García del Cura *et al.*, 1979; Ordóñez *et al.*, 1991).

Alternancias entre glauberita y sulfato cálcico

En origen, las alternancias se reducen a dos tipos: 1) glauberita-yeso primario laminado, y 2) glauberita-anhidrita nodular y/o enterolítica. A partir de estos dos tipos, se encuentran muchas variantes de alternancias según que las muestras procedan de profundidad o de superficie, es decir, hayan preservado sus minerales y texturas originales, o bien éstas se hayan transformado:

A) *Glauberita – yeso primario*. En ningún caso se ha observado alternancias entre glauberita y yeso primario.

B) *Yeso secundario procedente de glauberita – yeso primario laminado*. Sólo se ha observado estas alternancias en las cuencas Çorum-Çankari de Anatolia (Fig. 4C), donde la alteración de superficie ha transformado la glauberita en yeso secundario.

C) *Glauberita – anhidrita*. Estas alternancias, en litofacies tanto bandeadas como nodulares de ambos minerales, se reconocen en las galerías de mina y en las

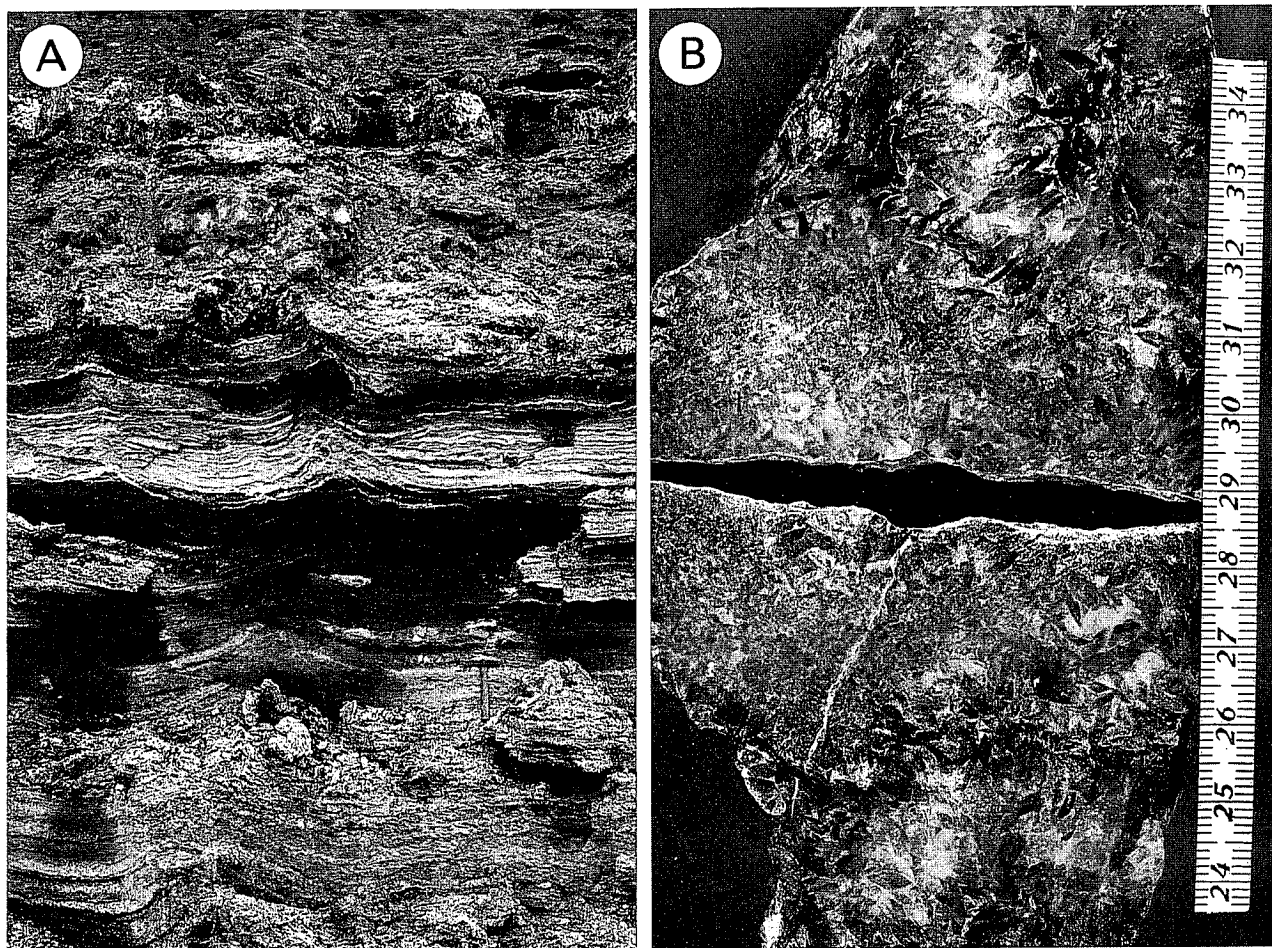


Figura 5.- Yesos de Cerezo, en el yacimiento de CRIMIDESA (Cerezo de Río Tirón, prov. Burgos). **A)** Capas de glauberita con litofacies bandeada. La deformación de la parte central de la figura puede responder a estructuras del tipo *tepee*. La parte superior está ocupada por un horizonte lutítico con grandes nódulos y capas nodulares de anhidrita (tono claro). La escala viene dada por el martillo (longitud: 33 cm). **B)** Detalle de la litofacies bandeada de glauberita de la figura anterior, en muestra pulida. La glauberita es euhedral, de tamaño aproximado entre 1 y 5 mm. Se aprecia una matriz muy fina de anhidrita (tono claro) entre la glauberita. Escala en cm.

muestras de sondeo de la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo (Ortí *et al.*, 1979; García del Cura *et al.*, 1979) y de los Yesos de Lerín (Salvany y Ortí, 1994), así como en los sondeos de otras varias unidades glauberíticas. En el caso de la anhidrita laminada, puede interpretarse que originalmente las láminas fueron de yeso primario, el cual se anhidritizó en el enterramiento. Una interpretación diferente fue propuesta por Ordóñez *et al.* (1991), según la cual la anhidrita laminada se formaría sinsedimentariamente en el fondo lacustre por disolución incongruente de la glauberita en momentos de dilución.

A mayor escala, alternancias entre potentes capas de glauberita y capas de lutitas con nódulos de anhidrita se presentan en los Yesos de Cerezo (Ortí *et al.*, 1979; Mendiña *et al.*, 1984) y, localmente, también en la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo (Ordóñez y García del Cura, 1994, fig. 5). En el caso de los Yesos de Cerezo, cabe pensar en alternancias entre lagos glauberíticos y episodios de llanura lutítica salina (Fig. 4D). Estos últimos episodios implicarían la pérdida del cuerpo de agua aflorante (el más intensamente evaporítico), la

dilución general del sistema hidrológico (que pasa a mantenerse como subterráneo), y la precipitación evaporítica limitada a anhidrita nodular, en posición intersticial.

D) Glauberita – yeso secundario laminado. Estas alternancias se observan en los afloramientos donde se emplazan las minas de Alcanadre, en los Yesos de Lerín (Fig. 4E). La litofacies laminada del yeso secundario procede de la correspondiente litofacies del yeso primario original (vía anhidritización del mismo). Estas alternancias pueden interpretarse como episodios de lago diluido y somero (láminas de yeso), seguidos de episodios lacustres de mayor concentración (glauberita) y menor profundidad de agua.

E) Yeso secundario procedente de glauberita – yeso secundario procedente de anhidrita nodular. Estas alternancias están bien representadas en la Unidad evaporítica inferior de la Cuenca de Calatayud. En ella, los nódulos y capas nodulares de anhidrita desplazan o reemplazan a la glauberita (Fig. 4F). La importancia del proceso sugiere dilución del sistema lacustre con llegada al mismo de soluciones ricas en sulfato cálcico, que

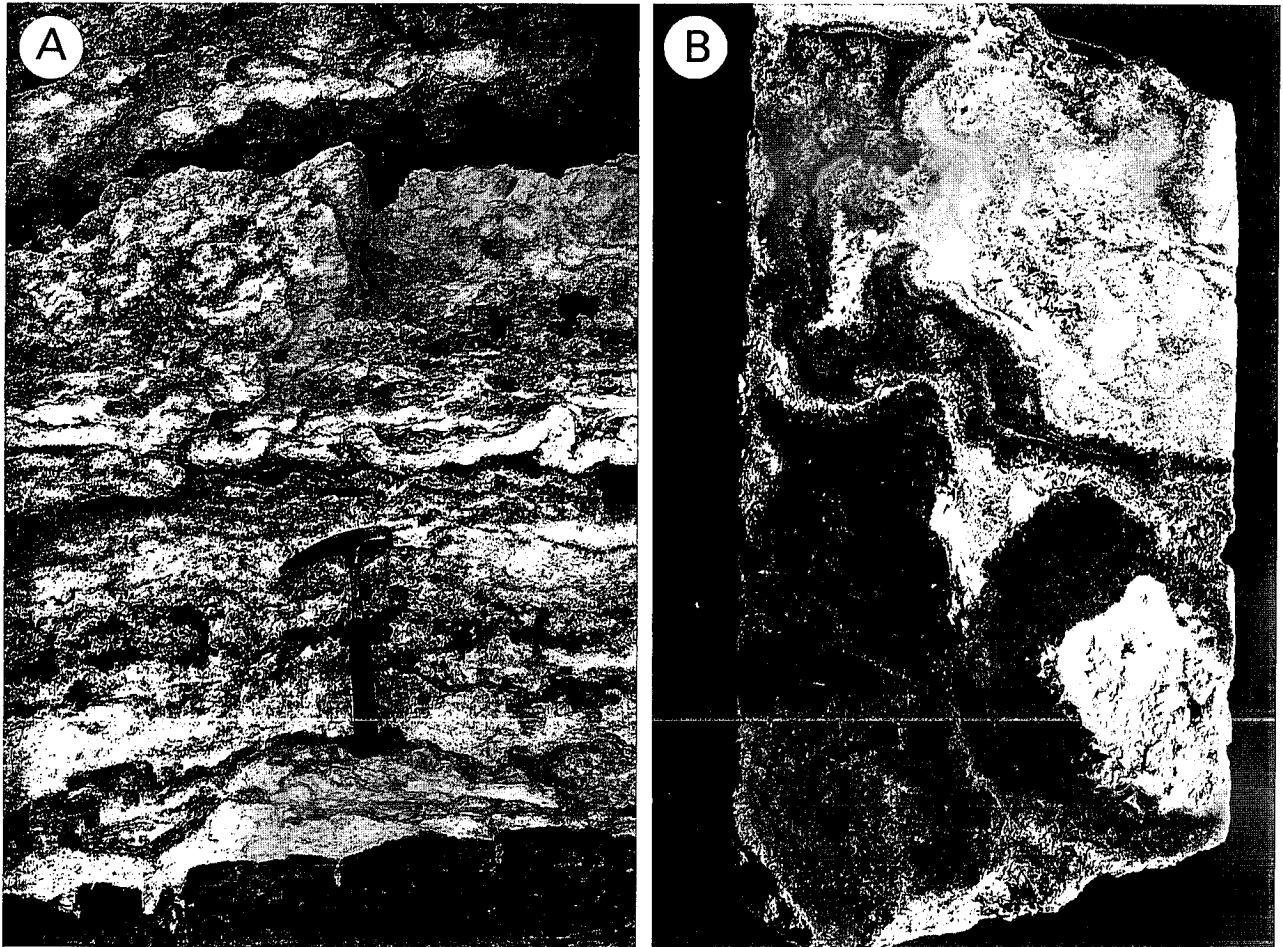


Figura 6.- Yesos de Lerín, en el yacimiento de la Ermita de Aradón (Alcanadre; La Rioja). **A)** Capas de glauberita, con pátina de alteración superficial blanca (eflorescencias de sulfato sódico). En la misma base de la figura las capas oscuras corresponden a yeso secundario laminado. En el conjunto glauberítico se aprecian diversas litofacias (masivas, nodulares y enterolíticas), algunas afectadas por cierta deformación. Las zonas grises corresponden a matriz lutítica encajante. Longitud del martillo: 34 cm. **B)** Muestra de glauberita microcristalina, en testigo de sondeo. La glauberita presenta nódulos (parte inferior) y láminas muy deformadas (parte superior). La glauberita varía desde oscura en los nódulos a diversos tonos de grises en las láminas. Tanto en los nódulos como en las láminas, el tamaño cristalino es mayor hacia los bordes. Las zonas más claras corresponden al encajante lutítico-carbonato. El conjunto muestra fluidificación. Altura del testigo: 12 cm.

provocan la disolución de la glauberita y el crecimiento asociado de anhidrita.

G) Yeso secundario procedente de glauberita – yeso secundario laminado procedente de yeso primario. En muchas unidades glauberíticas ibéricas tanto el yeso laminado como la glauberita están transformados en yeso secundario. Estas alternancias son las más frecuentes en los afloramientos.

Independientemente de todas estas alternancias, cabe distinguir entre dos tipos de *relaciones de reemplazamiento en la asociación anhidrita-glauberita*, según que la glauberita reemplace a la anhidrita, o al contrario. Ejemplos de reemplazamiento de glauberita sobre anhidrita se dan en algunas capas de los Yesos de Cerezo: los cristales de glauberita crecen sobre una matriz anhidrítica a la que reemplazan, mostrando aquéllos zonación de crecimiento (las zonas están constituidas por microcristales relictos de anhidrita). En este caso, la glauberita es diagenética temprana y tiene un precursor de sulfato cálcico. En sentido opuesto, reemplazamientos de anhidrita diagenética sobre glaube-

rita se dan en las muestras de sondeo de los Yesos de Zaragoza, donde los nódulos de anhidrita reemplazan a los agregados glauberíticos, y grandes cristales de glauberita están preservados pseudomórficamente en anhidrita y halita.

Alternancias entre glauberita y thenardita

Alternancias entre capas de glauberita y capas de thenardita están presentes en las unidades de varias cuencas, como las del Tajo, Calatayud y Bey pazari. El ejemplo correspondiente a esta última, con ciclos de lutita-glauberita-thenardita (Ortí y Helvací, 1995) se presenta en la figura 4G. Ciclos de lutita-thenardita (conteniendo el término lutítico también halita y glauberita) han sido citados localmente en la Cuenca del Tajo (Ordóñez y García del Cura, 1994). En todas estas alternancias, la thenardita cementa y/o reemplaza a la glauberita y, en general, el reemplazamiento parece ser diagenético relativamente temprano. En las dos unidades estudiadas (cuencas del Tajo y de Bey pazari), se deduce que la thenardita proviene del reemplazamiento

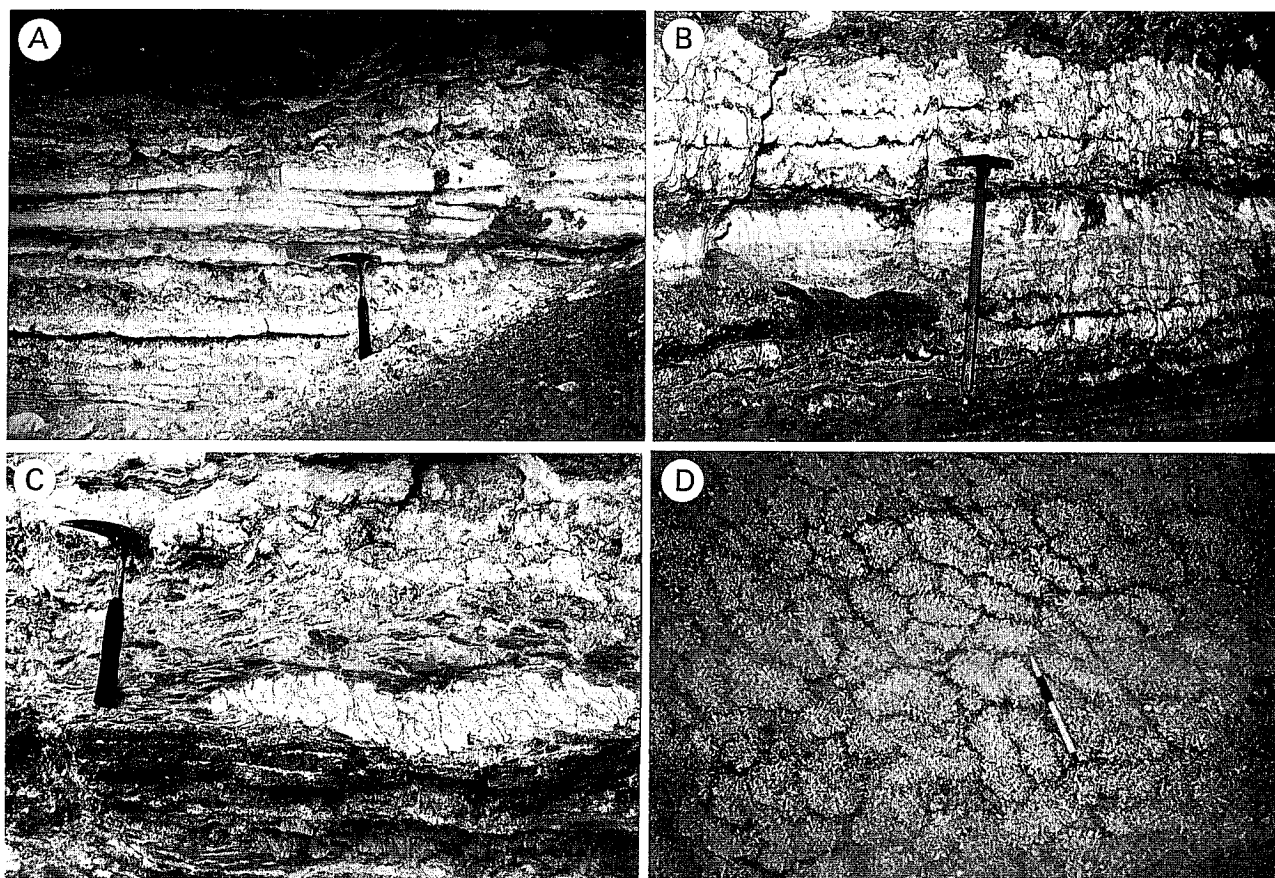


Figura 7. Yesos de Lerín, en el yacimiento de la Ermita de Aradón (Alcanadre, La Rioja). En las figuras A, B y C, los tonos blancos sobre la glauberita corresponden a pátinas de alteración (eflorescencias de sulfato sódico). A) Capas de glauberita con litofacies bandeada tabular, en afloramiento. Longitud del martillo: 34 cm. B) Capas de glauberita con litofacies bandeada nodular, en el interior de una galería de mina. Hacia la parte inferior, las capas pierden la pátina clara de alteración y se muestran en tono gris. Longitud (aproximada) del martillo: 60 cm. C) Capa enterolítica de glauberita (centro de la figura) en el seno de una capa de yeso secundario laminado, en afloramiento. Obsérvese el desplazamiento que han sufrido las láminas de yeso por el crecimiento intersticial de la glauberita. En la parte superior se observan capas de glauberita de litofacies nodulares. Longitud del martillo: 34 cm. D) Agregados de cristales de glauberita (precursora), ahora totalmente transformados en yeso secundario alabastrino de tono claro. Los pseudomorfos de glauberita tienen de 1-2 cm de longitud. Los agregados contienen matriz arcillosa y están rodeados por ella, y ofrecen una morfología de "pavimento". Longitud del lápiz utilizado como escala: 14 cm.

de un mineral precursor, que presumiblemente es mirabilita (Ordóñez *et al.*, 1977; Ortí *et al.*, 1979; Ortí y Helvací, 1995). La transformación debió darse en condiciones de diagénesis temprana (Ortí *et al.*, 1979; Ordóñez *et al.*, 1991). En ocasiones, incluso puede distinguirse entre dos generaciones de thenardita, una muy temprana que se comporta casi paragenéticamente con la glauberita, y otra algo más tardía que cementa tanto a la citada thenardita como a la glauberita asociada (Cuenca de Bey pazari).

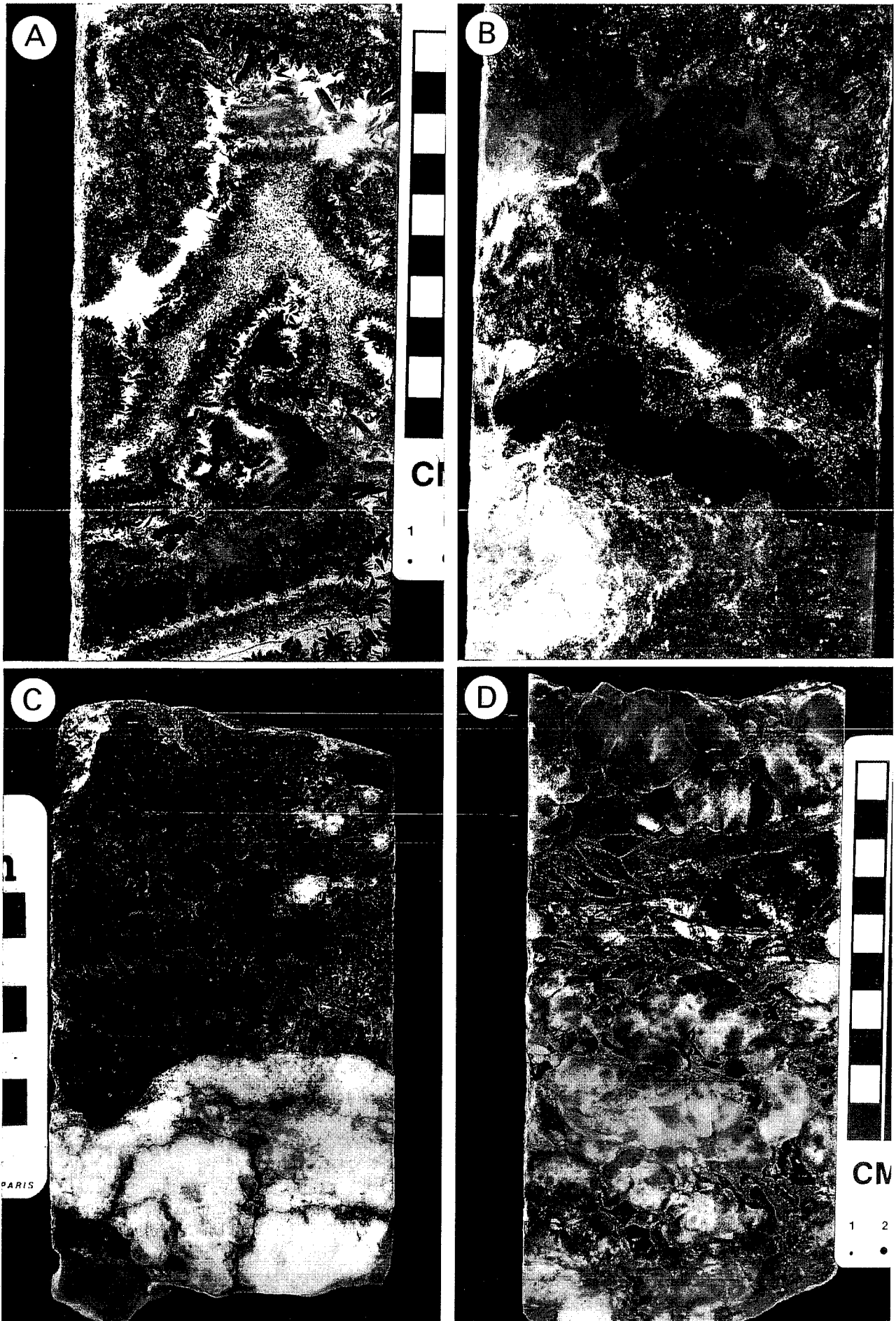
Alternancias entre glauberita y halita

Alternancias irregulares entre capas de glauberita y de halita son conocidas en la Cuenca del Tajo (Ortí *et al.*, 1979; García del Cura *et al.*, 1979), y en varias formaciones de la Cuenca del Ebro, como los Yesos de Falces y los Yesos de Lerín (Salvany, 1989), y los Yesos de Zaragoza (García-Veigas *et al.*, 1994), aunque son desconocidas en las cuencas de Calatayud y Bey pazari. La figura 4H presenta un ejemplo concreto en los Yesos de Zaragoza, donde se registran ciclos de lutita/glauberita-glauberita/halita-halita (García-Veigas *et al.*,

1994). En estas alternancias la glauberita suele ser euhedral y macrocristalina, y puede estar cementada (y en ocasiones reemplazada) por la halita. A esta asociación de glauberita y halita suele añadirse la anhidrita, y también la polihalita en los casos de la Unidad Salina (Cuenca del Tajo; García del Cura *et al.*, 1979; Ortí y Pueyo, 1980) y de los Yesos de Lerín (Cuenca del Ebro; Salvany y Ortí, 1994).

Ejemplos de litofacies, texturas y secuencias

En las figuras 5 a 14 se ofrecen algunos ejemplos de litofacies, texturas y secuencias de las unidades glauberíticas del Terciario consideradas en el presente trabajo, así como de procesos que han sido citados en los anteriores epígrafes (alternancias). Los Yesos de Cerezo (Fig. 5) están caracterizados por presentar: a) litofacies glauberíticas bandeadas; b) una alternancia entre horizontes de lutitas con anhidrita nodular y horizontes de glauberita (Fig. 5A); y c) matriz anhidrítica entre la glauberita en algunas capas (Fig. 5B). Los Yesos de Lerín (Figs. 6 y 7) se caracterizan por alternar diversas litofacies glauberíticas en las secuencias y por presen-



tar marcadas estructuras de fluidificación (Figs. 6A, B). Igualmente, se caracterizan por presentar las siguientes litofacies glauberíticas: a) bandeadas tabulares en la base de algunas capas (Fig. 7A); b) bandeadas nodulares (Fig. 7B); c) enterolíticas (Fig. 7C); y d) algunos agregados con aspecto de "pavimento" (Fig. 7D). Los Yesos de Zaragoza (Fig. 8) ofrecen buenos ejemplos de: a) estructuras de fluidificación afectando las diversas texturas de la glauberita (Fig. 8A), entre ellas la microcristalina de tono oscuro (Fig. 8B); b) anhidrita nodular reemplazando a la glauberita (Fig. 8C); y c) pseudomorfos de anhidrita nodular y halita transparente según glauberita euhedral (Fig. 8D). La Unidad evaporítica inferior de Calatayud (Fig. 9) presenta buenos ejemplos de nódulos y capas nodulares de anhidrita reemplazando y/o desplazando a las capas de glauberita. El Miembro Evaporítico de la Cuenca de Bey pazari (Fig. 10) muestra láminas de glauberita con texturas transparentes (Fig. 10A) y ciclos de glauberita-thenardita (Fig. 10B). Las unidades glauberíticas de otras cuencas de Anatolia muestran capas de agregados de glauberita alternando con capas de yeso primario (Figs. 10 C, D, E). La Unidad Salina de la Cuenca del Tajo (Figs. 11 a 14) presenta localmente: a) ciclos de somerización de glauberita tabular en la base y litofacies nodulares aplastadas y deformadas a techo (Figs. 11 y 12); b) capas cementadas por glauberita (Fig. 13); y c) capas pseudomórficas de yeso secundario según glauberita masiva macrocristalina intersticial (Fig. 14).

Procesos genéticos de la glauberita

Procesos conocidos en los ambientes glauberíticos actuales y holocenos

Algunos de los casos de precipitación de glauberita en los ambientes actuales y holocenos ayudan en la in-

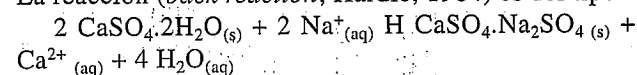
Figura 8.- Yesos de Zaragoza, sondeo PURASAL, en la mina de Remolinos (Zaragoza). Todas las fotografías corresponden a muestras pulidas de testigo: **A)** Estructura de deformación (fluidificación) en láminas glauberíticas. El material más claro es encajante arcilloso-carbonatado. Los cristales de glauberita en las láminas tiene diferentes tamaños, desde microcristalino hasta unos 5 mm. Se observan pequeñas rosetas individualizadas, y cristales dispuestos perpendicularmente a las láminas, en los bordes de las mismas. En la parte central del tercio inferior de la figura se aprecia glauberita microcristalina muy replegada, con tonos desde claros a muy oscuros. Obsérvese que las láminas basales no están deformadas. Escala en cm. **B)** Detalle de una masa replegada de glauberita microcristalina, con tonos desde gris claro a casi negros. Obsérvese la estructura de fluidificación. Altura de la figura: 5 cm. **C)** Detalle de micro y macronódulos de anhidrita (tono claro) reemplazando a glauberita euhedral organizada en agregados, en pequeñas rosetas y en cristales individualizados. La zona central laminada corresponde a matriz arcillosa. Escala en cm. **D)** Anhidrita nodular y pseudomorfos de halita-anhidrita según glauberita. En la parte central-inferior de la figura las zonas oscuras internodulares corresponden a cristales de halita transparente que actúa como cemento. En la parte superior se aprecian antiguos cristales de glauberita precursora, de entre 1 y 4 cm de longitud, ahora ocupados por anhidrita micronodular y halita transparente, destacando sobre un encajante arcilloso laminado al que desplazan. Escala en cm.

terpretación de las unidades glauberíticas del Terciario:

A) Precipitación en las zonas freática y vadoso-capilar. Esta precipitación ha sido descrita con detalle en las playas del sistema de descarga endorreico de Karinga Creek, Australia (Arakel y Cohen, 1991), donde los cristales de glauberita se forman tanto de un modo primario (zona freática) como secundario o reemplazante (zona vadosa). Esta precipitación de glauberita está favorecida por la mayor solubilidad del yeso en las salmueras de alta concentración dominadas por el cloruro sódico.

En la zona freática los cristales primarios crecen desplazando al sedimento encajante, dando nódulos y capas discontinuas lenticulares; los cristales son transparentes (sin inclusiones sólidas) y de diferentes tamaños, y pueden estar o no orientados en los nódulos. En la zona vadosa los cristales de glauberita suelen reemplazar parcialmente al yeso; además de dar texturas poiquilíticas que reemplazan o desplazan al sedimento encajante. En ambas zonas, la precipitación de glauberita se produce principalmente en verano a partir de salmueras de alto contenido en SO_4^{2-} y en Na^+ y de salinidad superior a 300 g/l, y se sitúa preferentemente en el techo de la zona freática y en la parte inferior de la zona vadosa. En relación con todo ello, Arakel y Cohen (1991) sugieren que las capas de glauberita de las formaciones antiguas pueden marcar las paleoposiciones de la lámina de agua subterránea.

B) Precipitación en lagos-playa y salares. El caso de Saline Valley (California), donde la glauberita precipita intersticialmente en forma de cristales sueltos y de costras, ha sido bien documentado por Hardie (1968). Esta glauberita es interpretada como un mineral autigénico precipitado en el seno del sedimento blando por la interacción de la salmuera intersticial, rica en SO_4^{2-} y en Na^+ , con el yeso de precipitación diagenética temprana. La reacción (*back reaction*; Hardie, 1984) es del tipo:



No obstante, Hardie (1968) también admite que parte de esta glauberita intersticial se forma directamente por la mezcla de salmueras ricas en sulfato sódico con soluciones subterráneas ricas en sulfato cálcico.

Precipitados de glauberita similares a los de Saline Valley han sido citados por Lowenstein *et al.* (1999) en los sondeos que cortan los potentes sedimentos holocenos de Death Valley (California). Al margen de estos dos ejemplos de lagos-playa en los que la glauberita tiene un desarrollo intersticial, la posibilidad de que el crecimiento de glauberita en este tipo de ambientes ocurra también de un modo subacuoso ha sido documentada por López *et al.* (1999) en el salar de Llamara (Chile). En este salar, pequeñas cantidades de glauberita habrían precipitado en algunas depresiones muy someras por el reemplazamiento sinsedimentario del yeso del fondo al reaccionar con las salmueras libres evolucionadas. En las lagunas actuales de Los Monegros y de La Mancha, en la Península Ibérica, Pueyo y De la Peña (1992) citan la formación de pequeños cristales euhe-



Figura 9.- Unidad evaporítica inferior de la Cuenca de Calatayud, en el afloramiento de la trinchera de la autovía de Aragón, al paso por esta localidad. Todo el material aflorante es yeso secundario (alabastrino de tono claro, y porfiroblástico de tono gris). La parte inferior de la figura está dominada por pequeños nódulos de anhidrita (precursora) que desplazan/reemplazan casi en su totalidad una litofacies laminada (de yeso primario laminado precursor). La franja central, sobre el martillo, está compuesta por agregados nodulosos, irregulares y aplastados de glauberita (precursora) macrocristalina, con pseudomorfos de hasta 5 cm. La franja superior está ocupada por nódulos de anhidrita (precursora). Tanto la anhidrita de los nódulos inferiores como la de los superiores reemplazó a la glauberita original en condiciones sinsedimentarias. Longitud del pico del martillo: 19 cm.

drales y zonados de glauberita, que se habrían formado por la interacción de cristales de yeso con salmueras de alto contenido en Na. Estos cristales de glauberita pueden ser parcialmente reemplazados por cristales de thenardita.

C) Precipitación en lagos perennes de profundidad variable. Mees (1999) ha estudiado la formación de halita-glauberita del sistema paleolacustre holoceno de la Cuenca de Taoudenni-Agorgott (Mali), que dejó de ser funcional hace unos 3000 años. La investigación realizada por Mees (1999) incluye propiamente el techo de este sistema, con un registro sedimentario de algo menos de 5 m. Las litofacies de la glauberita evolucionan desde masivas en la parte inferior a laminadas en la parte superior de la secuencia, y en ambos casos se interpreta la glauberita como precipitada de un modo primario y subacuoso, sin fases minerales precursoras.

De acuerdo con las texturas encontradas en la halita, el registro lacustre ha sido interpretado como relativamente profundo en la base de la secuencia y progresivamente más somero hacia su techo. En la glauberita laminada de los dos metros superiores de la secuencia, algunas láminas presentan dos tramos: uno basal más potente (1-3 cm) y con granoclasificación química directa (cristales disminuyendo de tamaño desde 1-2 mm a 50 μm), y otro superior de menor grosor (0,5 cm) y con granoclasificación inversa (cristales aumentando de tamaño desde 25-50 a 150 μm). La glauberita de granoclasificación directa suele tener inclusiones sólidas, respondiendo a un crecimiento intersticial cerca de la interfase sedimento-salmuera en una solución de concentración creciente, mientras que la glauberita de gra-

noclasificación inversa habría nucleado en el seno de la solución libre en proceso de dilución progresiva y se habría acumulado en el fondo. Este sistema lacustre es interpretado como perenne. En la alteración de superficie de esta secuencia, la glauberita da lugar a yeso, anhidrita y bassanita (Mees, 1998).

D) Precipitación en los lagos salinos y playas de Asia. La extensa franja de Asia central constituye el dominio más importante de precipitación glauberítica actual. Sin embargo, la documentación disponible sobre procesos sedimentológicos y diagenéticos en estos ambientes es aún muy incompleta. Además de las referencias que pueden encontrarse en las síntesis de Strakhov (1970) y Valyashko (1972a, b), nuevos datos se ofrecen en los artículos de Grokhovskii (1978) y Kurilenko *et al.* (1988). Los principales depósitos de la zona árida de Asia central son los siguientes:

1) Depósitos glauberíticos actuales y cuaternarios del Kara Bogaz: una de las formaciones glauberíticas más importantes de esta franja asiática se sitúa en el subsuelo del amplio golfo Kara Bogaz del Mar Caspio, cuyas salmueras subterráneas someras son intensamente explotadas (Kurilenko *et al.*, 1988). Durante el proceso de progresiva reducción areal y volumétrica de este golfo, ocurrido entre 1930 (18,3 km²) y 1980 (9,6 km²), se produjo inicialmente una secuencia de precipitados libres compuesta por calcita, aragonito, dolomita, yeso y mirabilita, que vino luego seguida de otra secuencia de halita, bloedita y epsomita, ya bajo lámina de agua muy somera. Hacia la mitad del siglo pasado se registró glauberita en el margen SW del golfo (Strakhov, 1970).

No obstante, existe cierta confusión en la literatura por lo que respecta a esta precipitación de glauberita. Así, Dzents-Litovskiy y Vasil'yev (1962; fig. 1) citan yeso, en lugar de glauberita, en la zona sur del Kara Bogaz. Tampoco Dickey (1968) hace referencia a precipitación alguna de glauberita en las zonas sur y oeste de dicho golfo durante 1960. Aunque los detalles de esta precipitación glauberítica (textura cristalina, posición de crecimiento respecto al sedimento, etc.), siempre según Strakhov (1970), no son bien conocidos, se trataría, muy posiblemente, de precipitados intersticiales en un margen del golfo ya desecado en 1956, de acuerdo con los datos de Dzents-Litovskiy y Vasil'yev (1962).

Los sondeos practicados en el subsuelo de este golfo registraron cuatro horizontes salinos. En dos de ellos, el segundo y el tercero, ambos con potencias de entre 3 y 18 m, se intercalan hasta cinco capas de glauberita, en alternancia con capas de halita, y con capas de bloedita y epsomita en menor proporción. Es conocida la textura "cristalina, porosa y vesicular" de la glauberita, así como el hecho de que las capas glauberíticas tengan una porosidad original del 20-25 % (Grokhovskii, 1978), pero la génesis de cada asociación glauberítica no está bien conocida.

2) Depósitos glauberíticos del Terciario: otros datos significativos de la presencia de glauberita en la zona

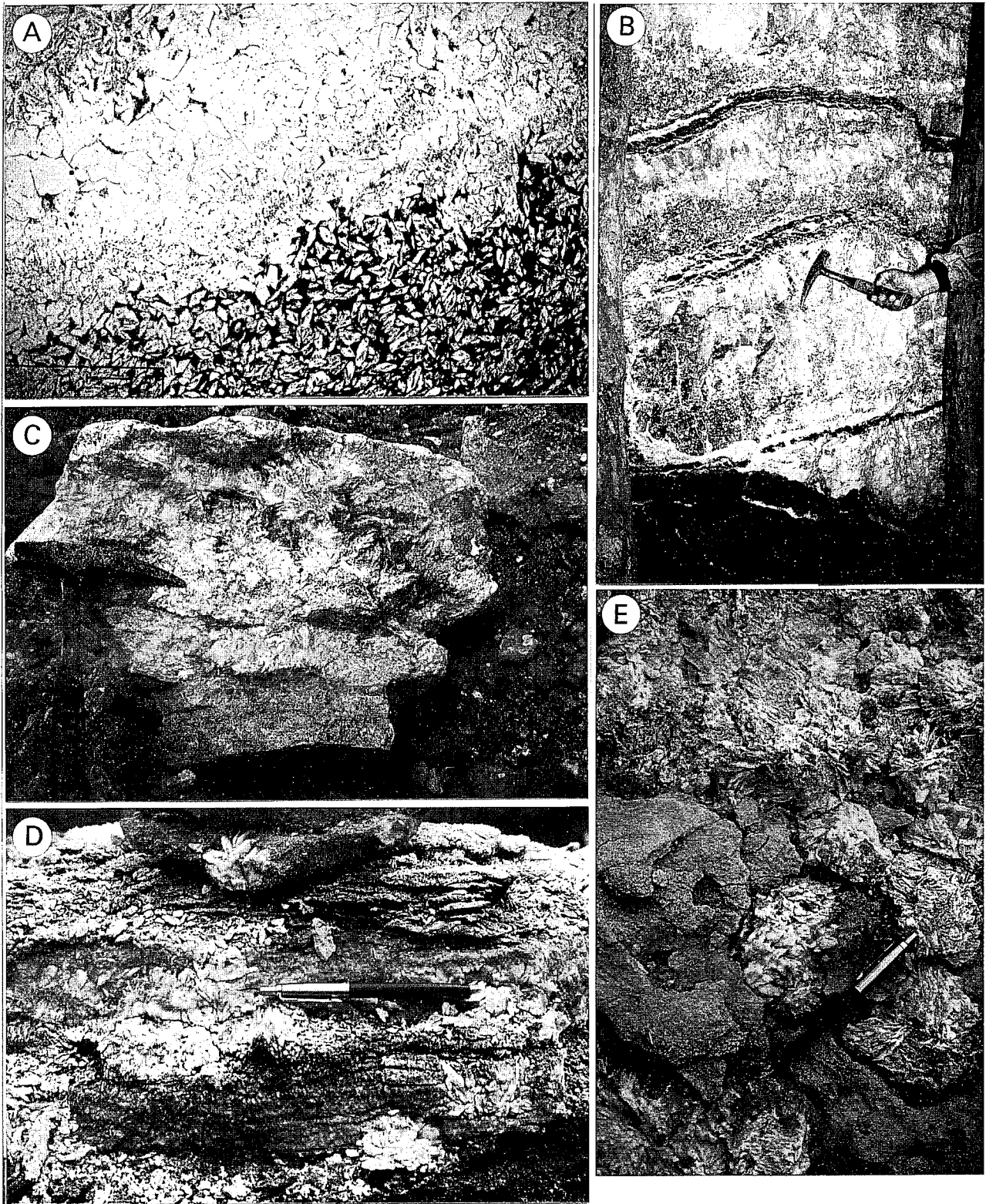


Figura 10.- Unidades glauberíticas de las cuencas terciarias de Anatolia. Figuras A y B: mina de Çayırhan, Miembro Evaporítico, Cuenca de Beypazari; figuras C, D, y E: cuencas Çorum-Çankari. **A)** Fotomicrografía, en luz paralela, de glauberita transparente. En la parte central-superior de la fotografía se aprecia una lámina de glauberita transparente, evolucionando de euhedral en su base a subhedral en el centro y techo. La lámina está limitada inferior y superiormente por sendas láminas de glauberita euhedral con abundante matriz arcillosa; en estas láminas los cristales de glauberita son ricos en inclusiones sólidas de esta misma matriz. El grosor de la lámina transparente es de unos 5 mm. **B)** Ciclos de lutita-glauberita-thernardita, en una galería de la mina de Çayırhan. Los horizontes de lutita son delgados y oscuros, y contienen lámina blancas de mirabilita fibrosa (producto de alteración de la thenardita y la glauberita). Por encima de los horizontes de lutita, los horizontes de glauberita son grises y relativamente irregulares, y contienen abundante lutita intersticial y thenardita cementante. En la parte superior de los ciclos domina el horizonte de thenardita transparente y macrocristalina, en cristales hasta decimétricos y de tono gris claro. **C)** Bloque caído, representativo de un ciclo de yeso-glauberita, con yeso primario laminado inferiormente (capas grises laminadas de la base), y superiormente bandas y masas irregulares de pseudomorfo de yeso alabastrino secundario (tono claro) según macrocristales de glauberita precursora. Longitud del pico del martillo: 19 cm. **D)** Yeso primario laminado (tono gris) que se encuentra desplazado/reemplazado por rosetas y agregados macrocristalinos de glauberita precursora (ahora pseudomorfo de yeso alabastrino secundario, de tono claro). Visión frontal de una capa. Longitud del bolígrafo usado como escala: 14 cm. **E)** Visión en planta del techo de la misma capa que en D, en la que se aprecia las formas de rosetas y agregados cristalinos de la glauberita precursora (tono claro), dispuestos entre las láminas de yeso primario (tono gris). Longitud del bolígrafo usado como escala: 14 cm.

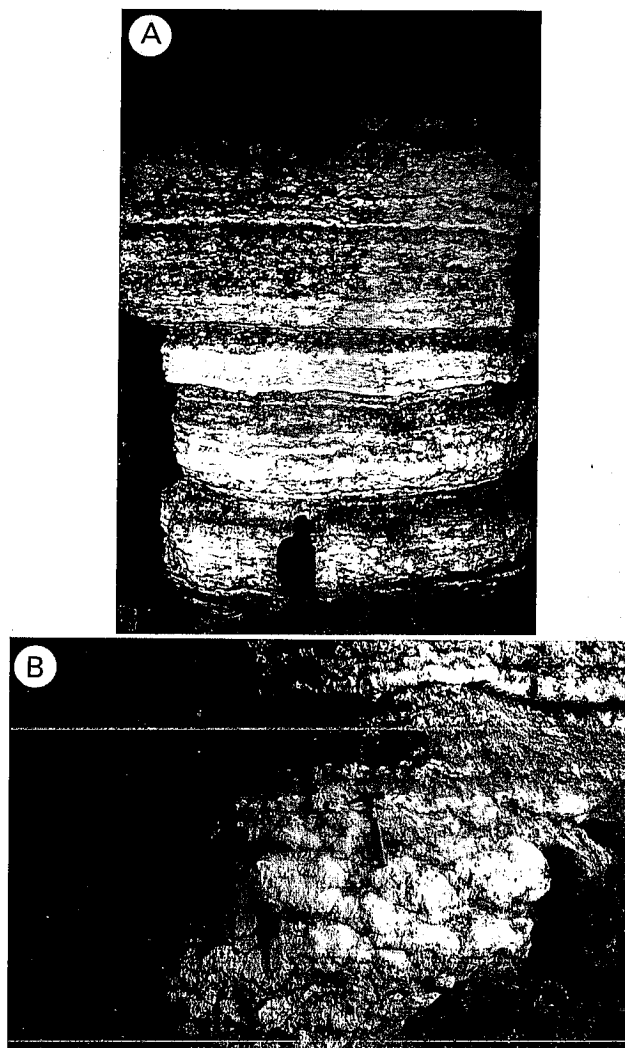


Figura 11.- Unidad Salina (Cuenca del Tajo) en la Mina Vicente (al E de Ciempozuelos). Las pálinas blancas superficiales sobre la glauberita son eflorescencias de sulfato sódico. **A)** Visión de los ciclos de glauberita-lutita, de orden métrico. Se aprecian las litofacies bandeadas tabulares en la base de algunas capas de glauberita, y las litofacies nodulares y bandeadas nodulares de las partes centrales y superiores de dichas capas. Estos ciclos lacustres puede interpretarse como de somerización muy rápida y con paso a condiciones subaéreas (litofacies nodulares). **B)** Detalle de las litofacies nodular y bandeado nodular de la glauberita de uno de los ciclos inferiores de la figura anterior. Algunos nódulos superan los 40 cm de longitud. Longitud del martillo: 32,5 cm.

asiática central han sido aportados por Grokhovskii (1978). En esta importante síntesis, sin embargo, sólo se exponen hipótesis genéticas sobre los depósitos actuales del tipo lago-playa, faltando interpretaciones precisas sobre los extensos y potentes depósitos del Terciario.

Estos depósitos terciarios corresponden a antiguos *lagoons* profundos y lagos, en particular los de la amplia zona Caspio-Arática, que evolucionaron separados del mar abierto durante el Oligoceno y Mioceno. En general, se trata de capas potentes de glauberita acompañadas de thenardita y halita, además de capas de yeso, carbonato y arcillas. Algunos de los casos citados

son los siguientes: A) depósitos salinos de Kichik-Kul (Aral), con una intercalación glauberítica de 85 m de potencia, de los cuales hasta 42 m contienen glauberita relativamente pura, y llegando a alcanzarse un 93% de mineral glauberita en un horizonte concreto de 12 m de potencia; y B) potentes capas de glauberita en paragénesis con halita, bloedita, thenardita y mirabilita, del Terciario de las cuencas del Tien-Shan. Cabe citar, entre ellas: capas individuales de glauberita de 12 m de potencia, alternando con capas de halita arcillosa, en los depósitos de Alabug-Naryn; depósitos de halita-glauberita de Kamysh-Kurgarisk; contenidos del 10-15% en glauberita en el depósito halítico de Kamysh-Kurganist (Miocenosuperior); y cantidades diversas de glauberita en los depósitos de Ketmen-Tyubinsk, Kochkorsk y Chul-Adyrsk.

3) Depósitos glauberíticos de lago-playa actuales y holocenos: en los lagos-playa holocenos y recientes de esta misma franja asiática también se forma glauberita, y, en general, su precipitación es atribuida por Grokhovskii (1978) a procesos diagenéticos muy complejos. Estos procesos implican la disolución y el reemplazamiento sistemático y sucesivo por glauberita de varias fases minerales preexistentes (mirabilita, bloedita, halita) al ser afectadas progresivamente por aguas subterráneas ricas en calcio. Independientemente de estos mecanismos complejos, también se concluye que la glauberita se forma en ciertas playas alimentadas por soluciones ricas en bicarbonatos, sulfatos y cloruros, aunque en ellas no precipiten otras sales, aparte de glauberita; en estos casos, la precipitación de la glauberita resultaría de la mezcla de salmueras libres ricas en sulfato sódico con soluciones subterráneas ricas en carbonato y sulfato cálcicos.

En estos lagos-playa holocenos y recientes se citan variedades de glauberita *pasty* (hasta un 50% de glauberita, y el resto formado por una mezcla de halita y yeso con sulfatos y carbonatos de Mg y Ca) y cristalininas (macrocrystalinas), tanto de tonos claros como oscuros (incluso negros). La cristalización de toda esta glauberita es intersticial y singenética, y con frecuencia está localizada en la base de las capas de halita o thenardita. La cristalización se genera al final de la evolución evaporítica de los lagos-playa caracterizados por salmueras con alto contenido en cloruro de Mg y Na, y contenidos de medios a bajos en sulfato.

Aplicabilidad de los procesos a las unidades glauberíticas terciarias ibéricas

De acuerdo con los casos de precipitación actual y holocena arriba citados, los posibles procesos de precipitación glauberítica serían los siguientes:

1) *Reemplazamiento sinsedimentario de yeso por glauberita* (Hardie, 1968). En general, en las unidades terciarias estudiadas suele faltar la evidencia petrográfica de este reemplazamiento, es decir, son muy raros los pseudomorfos de glauberita según yeso primario. Sin embargo, son muy frecuentes los crecimientos macroscópicos de glauberita en el seno de yesos lamina-

dos, con diferentes formas: como cristales aislados, nódulos, capas enterolíticas, rosetas, o agrupamientos cristalinos diversos. Ello sugiere que el reemplazamiento intersticial se ha desarrollado ampliamente. Por otro lado, las inclusiones de anhidrita relictá observadas en los cristales de glauberita en algunas unidades (Yesos de Cerezo, Menduñía *et al.*, 1984; Yesos de Lerín, Salvany y Ortí, 1994; Miembro Evaporítico de la Cuenca de Bey pazari) sugieren la existencia de un precursor de sulfato cálcico; dicha presencia, no obstante, suele ser limitada y no implica la generalización del proceso a toda la unidad.

2) *Reemplazamiento sinsedimentario de otros sulfatos por glauberita* (Grokhovskii, 1978). Los modos complejos de formación de glauberita por la reacción de aguas subterráneas ricas en Ca con mirabilita, bloedita y otros minerales preexistentes, citados por el referido autor en la franja asiática central, son difíciles de aplicar a las unidades terciarias consideradas en este trabajo debido a la relativa simplicidad de sus paragénesis. Aún así, indicios de estos procesos podrían inferirse de los reemplazamientos de polihalita y halita por glauberita que se observan en algunas unidades (Unidad Salina de la Cuenca el Tajo, Yesos de Lerín de la Cuenca del Ebro).

3) *Precipitación primaria intersticial por mezcla de salmueras* (Hardie, 1968; Eugster y Hardie, 1978; Grokhovskii, 1978). Una posible explicación del crecimiento intersticial predominante de glauberita en muchas unidades terciarias es la mezcla de salmueras lacustres libres con soluciones subterráneas que ascienden o fluyen hacia el fondo deposicional. Podría haber, al menos, dos variantes de este proceso: a) en una primera variante (Hardie, 1968; Eugster y Hardie, 1978), la mezcla entre salmueras lacustres ricas en sulfato de Na y densas (que se hunden en los sedimentos de fondo lacustre), con soluciones subterráneas ricas en Ca podría producir un crecimiento primario de cristales de glauberita en posición intersticial. Estas salmueras densas podrían generarse a partir de la disolución de precipitados preexistentes de mirabilita en los momentos de dilución; b) en una segunda variante (Grokhovskii, 1978), la mezcla de salmueras y soluciones subterráneas daría lugar directamente a la precipitación primaria o intersticial de glauberita, en ausencia de otras evaporitas.

4) *Precipitación primaria intersticial y subacuosa* (Mees, 1999). Las estructuras primarias de granoclasificación citadas por Mees (1999) se han identificado en algunas láminas del Miembro Evaporítico de la Cuenca de Bey pazari. En ellas, los cristales de glauberita también son ricos en inclusiones sólidas y han debido crecer intersticialmente en el fondo sedimentario. Todo indica que este crecimiento es mineralógicamente primario, en ausencia de fases precursoras de sulfato cálcico.

5) *Precipitación "libre", primaria*. En el caso de las formaciones de origen marino, es aceptada la precipitación primaria de glauberita a partir de la evolución de salmueras ricas en Ca (Harvie *et al.*, 1980). La preservación de este mineral en las secuencias marinas anti-

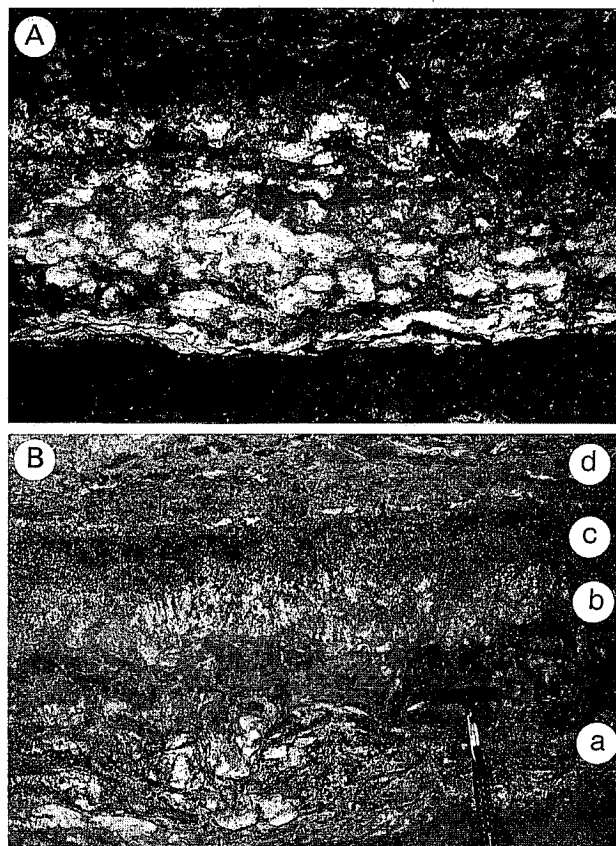


Figura 12.- Unidad Salina (Cuenca del Tajo) en la Mina Consuelo (al NE de San Martín de la Vega). A) Detalle de la capa de glauberita de uno de los ciclos, en la que dominan las litofacies nodulares y las masas irregulares de glauberita, afectadas por aplastamiento y deformación. En la misma base la litofacies tiende a ser bandeada tabular, aunque con cierta deformación. Longitud del martillo: 32,5 cm. B) Detalle de una de las capas arcilloso-glauberíticas que alternan con las capas de glauberita. En la figura se observa, de abajo arriba: a) la parte superior de la capa de glauberita (con el martillo de escala) de un ciclo, mostrando las litofacies nodulares deformadas; b) la capa de lutita-glauberita central del techo del ciclo, en la que las estructuras verticales (¿trazas de raíces?) están rodeadas de glauberita; c) el material oscuro de la capa es lutita con cemento de glauberita (en general, de textura anhedral, poiquilítica, fascicular, etc., cuando se ve al microscopio); y d) la base de la capa glauberítica de un ciclo superior (la litofacies tabular aquí sólo está insinuada). Longitud del martillo: 32,5 cm.

guas, como es el caso del Zechstein II, requiere su separación inicial (fraccionamiento) para evitar reacciones con las salmueras libres evolucionadas. Sin embargo, en el caso de las formaciones continentales la aceptación de esta precipitación siempre ha presentado dificultades, debido a que en los ambientes glauberíticos actuales no han sido documentados ni la granoclasificación química, ni la nucleación directa, ni el crecimiento libre de cristales de este mineral. Esto último es válido tanto se considere la interfase agua-aire, como la masa de agua, o el fondo deposicional. Por otro lado, la glauberita está ausente de los numerosos lagos salinos ricos en sulfato sódico, algunos de ellos profundos, de la extensa zona N de Great Plains, Canadá (Last, 1994).

Valoración de los procesos

La anterior exposición muestra que la discusión puede centrarse, principalmente, en dos procesos: 1)

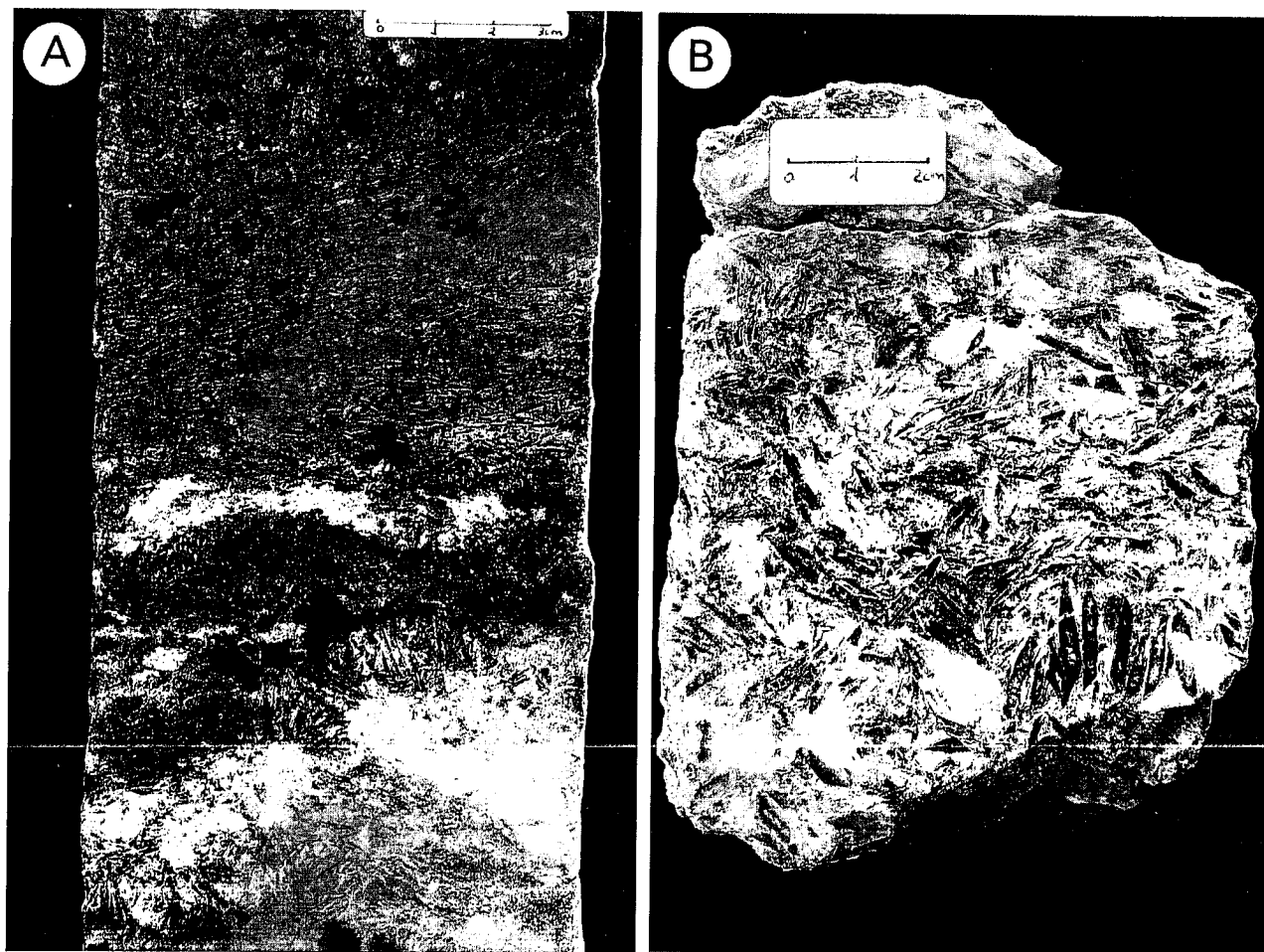


Figura 13.- Unidad Salina (Cuenca del Tajo). Muestras pulidas de glauberita de testigos del sondeo 3/605, ENUSA (Lascorz *et al.*, 1991). **A)** En la parte inferior se observan agregados de glauberita, con núcleos sin matriz y de tamaños cristalinicos menores, y con aureolas externas de cristales mayores, dispuestos perpendicularmente al núcleo y proyectándose contra la matriz lutítica. En la parte superior domina una acumulación (clástica?) de cristales de glauberita, en disposición subparalela a la estratificación. En todo el conjunto se aprecian áreas irregulares, de tono gris oscuro, que corresponden a cemento glauberítico (anhedral, poiquilítico, visto al microscopio) dando fuerte cohesión al encajante lutítico. **B)** Litofacies masiva macrocristalina de glauberita, sin matriz. Los cristales están, en general, desorientados. Escala en cm.

reemplazamiento de yeso o anhidrita precursores por glauberita, y 2) precipitación directa de glauberita, ya sea libre o intersticial, y debida tanto a la concentración evaporativa de una salmuera como a la mezcla de salmueras. En relación con el primer proceso, éste ha debido intervenir dado que: a) todas las unidades glauberíticas estudiadas se rodean de cinturones de sulfato cálcico, b) los crecimientos de glauberita en el seno de litofacies de yeso son abundantes, y c) la glauberita de varias unidades presenta inclusiones relictas de anhidrita. Ya se ha visto que la reacción del yeso preexistente con la salmuera evolucionada puede darse con quimismo final tanto de cloruro sódico (Arakel y Cohen, 1991) como de sulfato sódico (Hardie, 1968): halita o thenardita suelen intercalarse con la glauberita en las unidades glauberíticas estudiadas.

En relación con el segundo proceso, en el Miembro Evaporítico de la Cuenca Bey pazari se ha observado, aunque sólo muy localmente, finas láminas de glauberita transparente, lo que sugiere una precipitación directa sobre un fondo deposicional en momentos en que

no hay aporte de material detrítico. Estas láminas transparentes podrían formarse a partir del enfriamiento y hundimiento de soluciones saturadas o próximas a la saturación en sulfato sódico, aunque mediante este mecanismo sólo precipitaría una cantidad muy limitada de glauberita, dado el bajo contenido en calcio de tales soluciones. También se ha observado láminas con cristales granoclasificados y con núcleos llenos de inclusiones sólidas, lo cual indica que su crecimiento es intersticial.

Por otro lado, varios autores han citado en las unidades glauberíticas ibéricas estructuras sedimentarias que sugieren una precipitación primaria libre, como es la presencia local de granoclasificación (Yesos de Cerezo; Menduñía *et al.*, 1984) y de cristales en disposición subvertical (Ordóñez *et al.*, 1991). También se ha atribuido la glauberita euhedral a nucleación directa en la masa de agua seguida de hundimiento gravitativo, acumulación en el fondo y sobrecrecimiento (Unidad Salina, Cuenca del Tajo; Ordóñez *et al.*, 1991; Ordóñez y García del Cura, 1994). El crecimiento subacuoso de los cristales de glauberita, ya sea intersticial (entre el

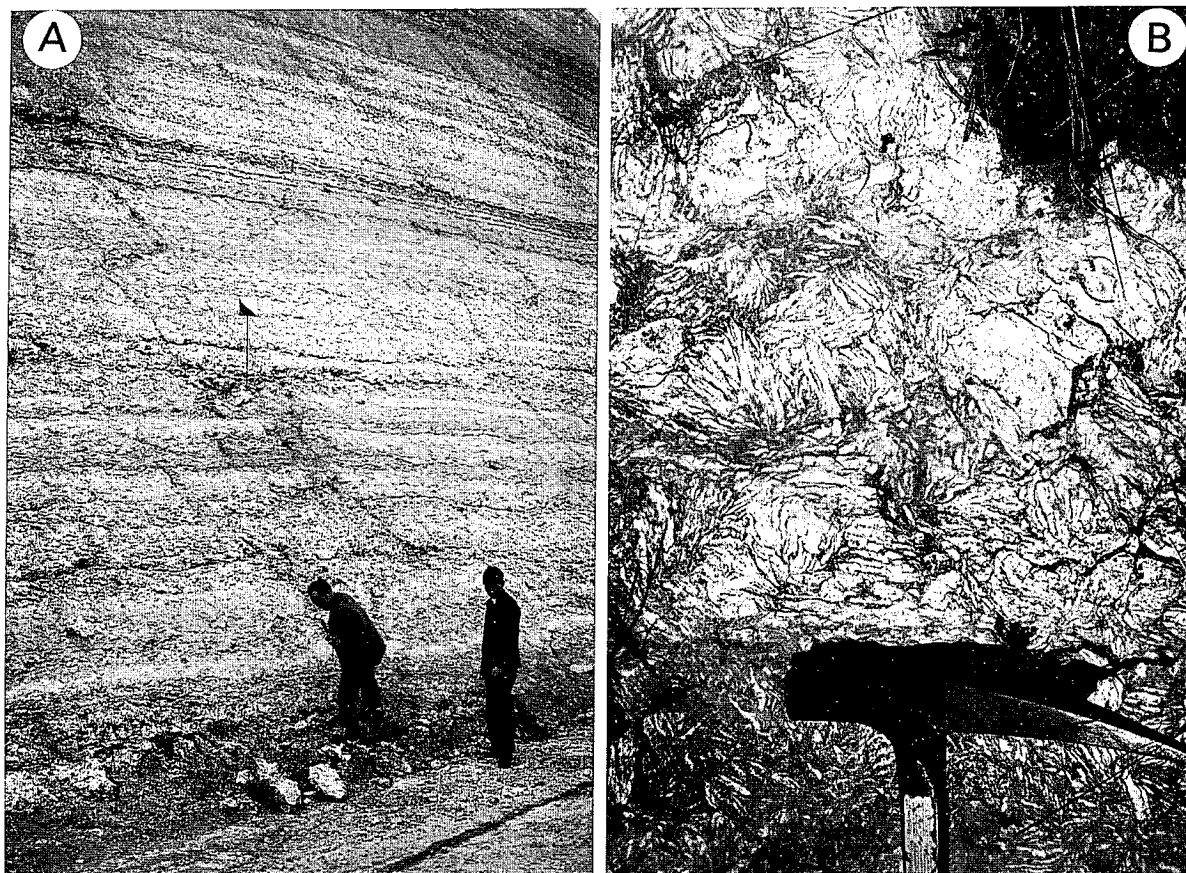


Figura 14.- Unidad Salina (Cuenca del Tajo). Afloramiento de la trinchera de la carretera (CM 4004) en Añover de Tajo. Todo el material glauberítico está transformado en yeso secundario alabastrino. **A)** Conjunto glauberítico (pseudomórfico) estratificado, en el que alternan capas más ricas en glauberita (más claras) y otras lutítico-glauberíticas (más grises). Se observan intercalaciones lutíticas en la base y hacia el techo de la sección. **B)** Detalle de una de las capas más ricas en glauberita: litofacies masiva macrocristalina con matriz encajante; los pseudomorfo de yeso alabastrino (tono claro) según glauberita precursora están agrupados en agregados y masas irregulares, y pueden estar algo deformados y plegados. La matriz arcillosa es de tono gris. Longitud del pico del martillo: 19 cm.

sedimento del fondo) o libre (sobre el fondo deposicional), es también contemplado por otros autores en los Yesos de Cerezo (Ortí *et al.*, 1979) y en los Yesos de Zaragoza (García-Veigas, 1993; García-Veigas *et al.*, 1994). A pesar de todo ello, son muy escasas las descripciones texturales de detalle que avalen inequívocamente todas estas interpretaciones.

Es posible imaginar, no obstante, una combinación de estos dos procesos principales, de tal modo que en los márgenes de los lagos terciarios fuera más relevante el efecto de precipitación de glauberita asociadamente al consumo/reemplazamiento del sulfato cálcico depositado previamente, mientras que en las zonas centrales de los lagos la glauberita llegara a precipitar como una fase mineralógicamente primaria, ya sea intersticial o libre, en los momentos de mayor salinidad.

Modelo lacustre y tipo hidroquímico de precipitación glauberítica

Subambientes de lago glauberítico

Integrando la información de que disponemos en las diferentes unidades glauberíticas del Terciario consideradas en este trabajo, puede proponerse un modelo idealizado de sistema lacustre "glauberítico", que destaca tres subambientes (Fig. 15):

A) Centro lacustre. En subambiente de centro lacustre dominan las litofacies laminadas y bandeadas tabulares que están, en general, poco afectadas por deformación. También parecen ser propias de este subambiente tanto la litofacies microcristalina, ya sea masiva o laminada, como la litofacies macrocristalina sin matriz. Aunque no hay pruebas seguras de cristales acumulados gravitativamente, es posible que parte de los cristales de glauberita se hayan sedimentado por este proceso. A este subambiente corresponden también las láminas de glauberita transparente, y las láminas con granoclasificación directa de cristales intersticiales formados en el fondo deposicional. Así pues, parece probable que en este subambiente una parte, al menos, de la glauberita sea de precipitación primaria y subacuosa.

En momentos de dilución del cuerpo lacustre, todas estas litofacies pueden alternar con yeso primario laminado. Por el contrario, en momentos de mayor concentración pueden alternar con evaporitas más solubles, como capas de halita (con o sin polihalita) o de mirabilita-thenardita, dando ciclos bien definidos. Más excepcionalmente se formarían precipitados simultáneos de halita y glauberita (García-Veigas *et al.*, 1994). Aunque puede haber estadios iniciales de estratificación (lago meromórfico), presumiblemente en los momentos de

mayor precipitación de sales este subambiente tiene una masa de agua homogeneizada (no estratificada) y es, en general, de poco profundo a muy somero. La extensión de este centro lacustre es muy variable. De acuerdo con los datos de distribución de thenardita y de halita en las unidades consideradas en este trabajo, la extensión de los cuerpos centrales con thenardita parece ser, en general, inferior a la de los cuerpos con halita.

B) *Zona lacustre intermedia*. En subambiente intermedio lacustre, ya de débil profundidad de lámina de agua y con intervalos de desecación desde esporádicos a frecuentes, parecen formarse las litofacies dominantes en la mayoría de unidades estudiadas, como son las bandeadas tabulares y bandeadas nodulares, nodulares, enterolíticas, y las masivas macrocristalinas con matriz, todas ellas propias de crecimiento intersticial y muy afectadas por estructuras de deformación y fluidificación. El paso en la vertical de litofacies bandeadas tabulares a bandeadas nodulares descrito en el epígrafe de "alternancias" responde a secuencias de somerización en este subambiente. Los cristales que componen todas estas litofacies presentan sobrecrecimientos sintaxiales, así como heterometría o marcada bimodalidad y, en las zonas externas de las masas glauberíticas, estos cristales parecen crecer y sobrecrecer sincrónicamente a la progresiva deformación. Probablemente, todas estas características son propias de cristalizaciones en las zonas freática y/o vadoso-capilar como respuesta a las continuas oscilaciones de la lámina de agua. Aunque muchos de los crecimientos dominantes son intersticiales, los cristales pueden estar libres de inclusiones sólidas.

Las deformaciones de las litofacies también pueden responder al efecto de contracción por desecación y poligonización del sedimento, y a la aparición de costras salinas. De hecho, algunas morfologías muy irregulares (fluidales, estiradas, discontinuas, fracturadas) de las masas glauberíticas recuerdan las estructuras de las costras salinas descritas en formaciones evaporíticas modernas y antiguas (Smoot y Castens-Seidell, 1994). Buena parte de todos estos crecimientos de glauberita pueden generarse a partir de la disolución o el reemplazamiento de fases preexistentes de sulfato cálcico, principalmente de yeso, cuya solubilidad aumenta con la progresiva concentración de la salmuera, y también de anhidrita nodular. A su vez, en momentos de dilución del sistema lacustre, parte de la glauberita es reemplazada por anhidrita.

Descripciones que parecen propias de este subambiente han sido hechas por Salvany y Ortí (1994) en los Yesos de Lerín de la Cuenca del Ebro. En la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo, cortes que pueden responder a este subambiente son los de Mina Consuelo ("secuencia tipo Mina Consuelo", de Ortí *et al.*, 1979, fig. 37), y de Mina Consuelo y Sulquisa descritos por Ordóñez y García del Cura (1994, figs. 4 y 5). Las características de la glauberita en Mina Consuelo fueron atribuidas a facies marginales por García del Cura *et al.* (1992). Por su riqueza en glauberita, este subambiente tiene gran interés económico.

C) *Margen lacustre/llanura lutítica salina*. En subambiente lacustre aún más marginal (margen de lago salino y llanura lutítica salina), ya predominantemente emergido y controlado por la lámina de agua subterránea, parecen formarse las litofacies masivas macrocristalinas con matriz, y las masivas cementantes, de texturas más o menos anhedrales. Las primeras presentan morfologías variadas, desde en masas irregulares a en rosetas. Las segundas pueden constituir niveles del sedimento encajante endurecidos por la cementación glauberítica, que recordarían las costras que se generan al techo de las zonas freáticas (relacionadas con procesos edáficos, en general). En ambos casos, estos precipitados intersticiales pueden representar las antiguas posiciones subterráneas de la lámina de agua. Lascorz *et al.* (1991), y Lascorz y Ortí (1993) identifican en un sondeo de la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo cementos poiquilíticos de glauberita asociados a capas duras, acompañando a macrocristales del mismo mineral. De hecho, la localización de estas variedades cementantes de glauberita hacia los márgenes lacustres ha sido sugerida en varios trabajos (Ortí *et al.*, 1979; Lascorz *et al.*, 1991; Ordóñez y García del Cura, 1994). A su vez, parte de estos precipitados pueden también provenir de la disolución y reemplazamiento de fases preexistentes de yeso/anhidrita.

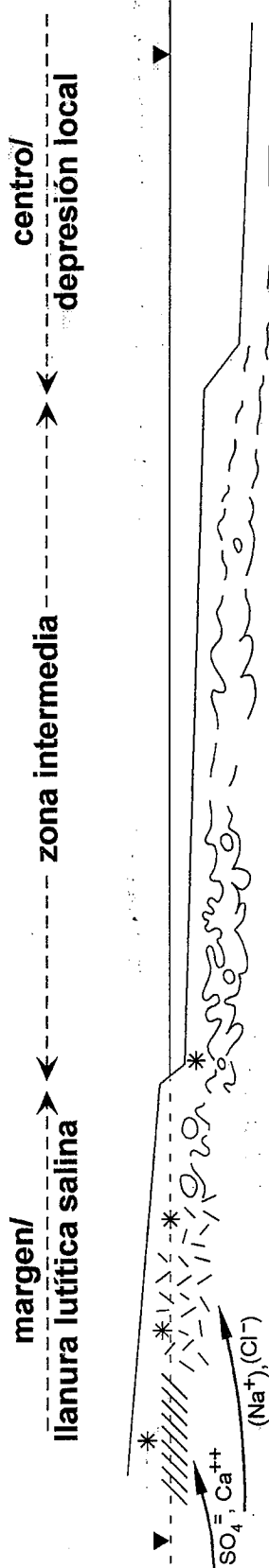
En el conjunto de este sistema lacustre, el tamaño de los cristales de la glauberita es menor hacia el centro deposicional y mayor hacia el exterior (Fig. 15). En lo que se refiere al sulfato cálcico, la figura 15 también distingue entre los momentos de dilución lacustre, con precipitación de yeso laminado en el centro lacustre, y los de pérdida del cuerpo lacustre y paso a posición subterránea de la lámina de agua. En este último caso, el precipitado dominante es la anhidrita nodular, de crecimiento intersticial entre las lutitas. Así pues, las alternancias entre horizontes de glauberita y horizontes de anhidrita nodular responden, respectivamente, a instalaciones de lago salino y a pérdida del mismo. Similares alternancias, con yeso/glauberita en los tramos lutíticos, y halita/thenardita en los tramos de lago salino, se registran en el Holoceno de Death Valley (Lowenstein *et al.*, 1999).

La figura 15 viene a representar una situación idealizada de precipitación glauberítica. En general, los sedimentos que hemos encontrado en las diversas unidades glauberíticas estudiadas corresponden más frecuentemente a los de la zona intermedia. Los sedimentos del margen/llanura lutítica suelen corresponder a facies de sulfato cálcico, a las cuales cambian lateralmente las facies glauberíticas (Fig. 3), y los del centro lacustre/depresión local suelen corresponder a halita o mirabilita/thenardita. En los momentos de mayor aporte de soluciones subterráneas ricas en sulfato cálcico, buena parte de la zona intermedia glauberítica puede ser reemplazada por anhidrita nodular.

Tipo hidroquímico

El tipo hidroquímico general al que pertenecen las unidades glauberíticas estudiadas es el sulfatado sódico

SUBAMBIENTES DE LAGO GLAUBERÍTICO



LITOFACIES Y PRECIPITADOS DE GLAUBERITA:

- | | | |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> -nódulos, capas enterolíticas -macrocrisales sueltos, o agregados en rosetas, masas irregulares, pavimentos, etc. rodeados de matriz -cementos poiquilíticos, anhedrales -costras duras (por cementación) -estructuras de deformación y retracción/expansión | <ul style="list-style-type: none"> -bandeada, bandeada nodular, nódulos, capas enterolíticas -microcristalina masiva -masiva macrocristalina con o sin matriz (intersticial) -estructuras de deformación/fluidificación -crecimientos y sobrecrecimientos sucesivos, fábricas en empalizada externa, sincrónicas con la deformación -cementos desplazantes/reemplazantes | <ul style="list-style-type: none"> -laminada, bandeada tabular -microcristalina laminada -masiva microcristalina, sin matriz -láminas transparentes, o con granoclasificación -deformación limitada |
|--|--|--|

(+) pocos mm a 1 dm

1 mm a pocos cm

< 1 mm a 1 cm (-)

Tendencia creciente del tamaño cristalino de la glauberita

SULFATOS CÁLCICOS ASOCIADOS:

- CICLOS EN ETAPAS DE CONCENTRACIÓN:
- glauberita-mirabilita/thenardita
 - glauberita-halita (± polihalita)

Dilución lacustre:



Pérdida del cuerpo lacustre y paso a llanura lútica:



anhidrita nodular/enterolítica y yeso intersticial (lenticulas, rosetas) entre lutitas

Figura 15.- Esquema interpretativo de los subambientes de un lago "glauberítico" del Terciario ibérico. Se trata, en general, de un lago salino somero, sometido a oscilaciones de lámina de agua y a posibles desecaciones. El esquema refleja un momento (hipotético) en el que habría sólo precipitación de glauberita en el sistema lacustre. Se indica también las facies de sales sódicas que se intercalan en el centro lacustre en los momentos de mayor concentración de la salmuera y reducción volumétrica del lago, así como las facies de sulfato cálcico asociadas tanto a los momentos de dilución relativa del lago como de pérdida del sistema lacustre (paso a llanura lútica, ya sea seca o salina). Los tamaños cristalinos para la glauberita en cada subambientes son sólo orientativos.

(Eugster y Hardie, 1978). Debido a la ausencia de inclusiones fluidas en la glauberita (o a la dificultad de su estudio dado su pequeño tamaño), no existen datos del quimismo de las salmueras en el momento de esta precipitación. La información existente, bastante limitada, proviene del estudio de las inclusiones fluidas de la sal asociada a la glauberita de los Yesos de Zaragoza (García-Veigas, 1993; García-Veigas *et al.*, 1994) en el sondeo PURASAL de la mina de Remolinos. El quimismo de estas inclusiones corresponde al sistema Cl-Na-SO₄. Las inclusiones fluidas de esta halita son deficitarias en todos los cationes, excepto el Na⁺; el bajo contenido en SO₄⁼ resulta insuficiente para la precipitación de thenardita/mirabilita.

Puede establecerse la siguiente evolución de la salmuera en su marcha desde el exterior hacia el centro del sistema lacustre: A) Aporte hídrico desde el exterior: este aporte es del tipo SO₄-Ca-(Na)-(Cl), con una relación molar SO₄/Ca > 1. B) Zona marginal lacustre: en esta zona se produce la precipitación de yeso/anhidrita, con el consiguiente empobrecimiento en Ca²⁺ de la salmuera. C) Zona intermedia lacustre: la salmuera en esta zona es del tipo SO₄-Na-Cl-(Ca), y de ella precipita glauberita. Tras esta precipitación, la salmuera queda deficitaria en Ca²⁺ y empobrecida en SO₄⁼. D) Zona central lacustre: la salmuera es el tipo Na-Cl-(SO₄), y de ella precipita principalmente halita (sin inclusiones paragenéticas de anhidrita ni glauberita). Esta salmuera se mantiene invariable hasta su completa evaporación.

Frente a este tipo hidroquímico, con paragénesis de yeso/anhidrita-glauberita-halita, se destaca otro que, aunque similar, presenta contenidos apreciables en Mg²⁺ y K⁺, dando lugar a la paragénesis de yeso/anhidrita-glauberita-halita+polihalita, y que incluye mayores cantidades de magnesita que el primero. Este segundo tipo, caracterizado por una salmuera de Na-Cl-(SO₄)-(Mg), está representado por los Yesos de Lerín en la Cuenca del Ebro y por la Unidad Salina (subunidad inferior) en la Cuenca del Tajo. Un tercer tipo hidroquímico viene dado por la presencia de thenardita y la ausencia de halita; este tipo tiene una paragénesis sulfatada de yeso/anhidrita-glauberita-thenardita/mirabilita, y una salmuera final de Na-SO₄-(Cl). Unidades glauberíticas pertenecientes a este tipo son la Unidad evaporítica inferior de la Cuenca de Calatayud, el Miembro Evaporítico de la Cuenca de Beypazari y la Unidad Salina (subunidad superior) de la Cuenca del Tajo. La cantidad de magnesita asociada a este tipo es variable, desde importante (Unidad Salina y Unidad evaporítica inferior) a limitada (Miembro Evaporítico). Sólo en el caso de la Unidad Salina de la Cuenca del Tajo se registran paragénesis de los tipos hidroquímicos segundo y tercero; el tránsito en la vertical entre ambos es muy brusco y ha dado lugar a diversas interpretaciones (García del Cura *et al.*, 1979; Ortí *et al.*, 1979; Ordóñez y García del Cura, 1994).

Importancia de la anhidrita en las unidades ibéricas

Aparentemente, todas las descripciones de sistemas

lacustres actuales o de formaciones terciarias continentales, excepción hecha de las formaciones ibéricas, en las que interviene la glauberita se caracterizan por la ausencia de anhidrita. Referencias a este mineral faltan tanto en los diversos trabajos que nos han llegado de la zona asiática (Strakhov, 1970; Valyashko, 1972a, b; Grokhovskii, 1978) como de las restantes zonas áridas endorreicas actuales o del Cuaternario. Por el contrario, las formaciones del Terciario ibérico se caracterizan por una marcada presencia de anhidrita sinsedimentaria, principalmente en litofacies nodular. Esta anhidrita puede ser reemplazada por la glauberita tanto en el centro lacustre (Yesos de Cerezo) como en la zona lacustre intermedia (Yesos de Lerín, Salvany, 1989; Unidad Salina de la Cuenca del Tajo, García del Cura *et al.*, 1992). En la Unidad evaporítica inferior de la Cuenca de Calatayud, Ortí y Rosell (2000) hacen una distinción a lo ancho del sistema lacustre entre diversas litofacies anhidriticas (nodulares, meganodulares, laminadas de reemplazamiento de yeso laminado) e interpretan los diferentes momentos diagenéticos de su aparición (sinsedimentario, diagenético temprano-enterramiento somero, enterramiento somero-enterramiento moderado). En cualquier caso, la anhidrita sinsedimentaria es un componente importante de las paragénesis glauberíticas. En las facies de centro lacustre de las unidades estudiadas (Fig. 15), también la anhidrita que acompaña inicialmente a la halita o a la thenardita-glauberita es fundamentalmente nodular y enterolítica, y se originó de un modo sinsedimentario. Este tipo de asociación halita-anhidrita indica, además, que los centros lacustres fueron someros.

Observaciones finales

El trabajo de Mees (1999) ha significado una contribución importante a la génesis de la glauberita en ambientes continentales, al identificar claramente una estructura deposicional (granoclasificación directa seguida verticalmente de granoclasificación inversa) que permite interpretar inequívocamente la glauberita como primaria. Asociadamente a este hecho, la riqueza en texturas primarias de la halita asociada a la glauberita permite interpretar la evolución batimétrica del depósito halítico-glauberítico, estableciendo el carácter subacuoso y somero de la glauberita laminada.

En el caso de las unidades glauberíticas con halita asociada, y de edad terciaria, consideradas en el presente trabajo, las observaciones hasta hoy realizadas sólo detectan en la halita fábricas de *chevrons* y texturas de *hoppers*, características de ambientes muy someros, además de abundantes texturas de disolución y reprecipitación salina (Ortí *et al.*, 1979; García-Veigas, 1993; Salvany y Ortí, 1994), y no muestran texturas de cristales acumulados y gradados que sugieran cierta profundidad de lámina de agua, como es el caso descrito por Mees (1999).

A pesar del modelo interpretativo propuesto (Fig. 15), creemos que los criterios para interpretar algunas de las litofacies y texturas glauberíticas aquí citadas,

como la litofacies masiva macrocristalina sin matriz, y la litofacies microcristalina, ya sea masiva o laminada, no parecen estar aún bien establecidos. Tampoco parecen estarlo las condiciones genéticas de las abundantes deformaciones que caracterizan a muchas de las litofacies. Presumiblemente, se requiere de nuevos y detallados estudios para valorar mejor el significado de todas estas litofacies y estructuras.

Conclusiones

El carácter del presente trabajo, de visión global sobre la compleja temática de las unidades glauberíticas del Terciario, no se presta a un apartado específico de conclusiones. A modo de reflexión podemos, únicamente, resaltar algunos puntos de interés que han surgido de la comparación entre las diversas unidades aquí consideradas:

A) Las unidades glauberíticas ibéricas están caracterizadas por la asociación entre la anhidrita y la glauberita, tanto desde el punto de vista de las paragénesis como de los ciclos deposicionales. También llama la atención la ausencia de yeso primario asociado a glauberita. En este sentido, los ejemplos actuales y del Cuaternario, en los que domina la asociación entre glauberita y yeso primario, faltando la anhidrita, son de ayuda sólo limitada para comprender la génesis de las unidades terciarias ibéricas.

B) El conocimiento de que disponemos en la actualidad de los procesos genéticos de la glauberita en estas unidades terciarias dista mucho de ser satisfactorio. En particular, la disyuntiva interpretativa "precipitado directo (subacuoso) en ambiente lacustre" versus "producto de reemplazamiento (intersticial y sinsedimentario) del yeso preexistente", requiere nuevos estudios y observaciones. En el caso que nos ocupa, esta disyuntiva puede ampliarse a la anhidrita como fase precursora de la glauberita. No obstante, hay indicios texturales de que la glauberita ha sido, al menos localmente, un precipitado libre en la salmuera o sobre el fondo deposicional en los centros lacustres.

C) Las unidades glauberíticas constituyen, cada vez más, un elemento esencial de las grandes formaciones evaporíticas que ocuparon los depocentros de las cuencas continentales en la Península Ibérica durante el Terciario; no puede descartarse, por el momento, el hallazgo de nuevas unidades. En el caso de Anatolia, estas posibilidades son muy amplias, estando en sus inicios el proceso de descubrimiento y caracterización.

D) Los estudios de campo (identificación de pseudomorfo y de litofacies características) y petrográficos (identificación de fábricas-diagnóstico, principalmente del tipo alabastrino) se revelan decisivos para la localización en superficie de este tipo de unidades. Estos métodos, relativamente sencillos, son un complemento muy valioso de otras técnicas mucho más costosas de prospección de subsuelo.

E) Parece posible la diferenciación de los ambientes lacustres glauberíticos del Terciario ibérico en varios

subambientes, que comprenden zonas centrales, intermedias y marginales, todas ellas con litofacies diferenciadas de la glauberita.

El presente trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto D.G.I.C.Y.T. PB97-0905. El autor agradece al Dr. Donald E. Garrett (Saline Processors, Inc. Ojai. CA) el material bibliográfico suministrado y los comentarios realizados en una visita de campo a las formaciones ibéricas, a la Dra. L. Rosell (Universitat de Barcelona) las numerosas sugerencias a una primera versión del trabajo, y a los Drs. J.A. de la Peña (Universidad Complutense de Madrid) y J. García Veigas (Universitat de Barcelona) las revisiones, muy constructivas, del manuscrito original.

Bibliografía

- Anadón, P., Ortí, F. y Rosell, L. (1997): Unidades evaporíticas de la zona de Libros-Cascante (Mioceno, Cuenca de Teruel): características estratigráficas y sedimentológicas. *Cuad. Geol. Ibér.*, 22: 283-304.
- Arakel, A.V. y Cohen, A. (1991): Deposition and early diagenesis of playa glauberite in the Karinga Creek drainage system, Northern Territory, Australia. *Sedim. Geol.*, 70: 41-59.
- Dickey, P.A. (1968): Contemporary nonmarine sedimentation in Soviet Central Asia. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bulletin*, 52: 2396-2421.
- Dzens-Litovskiy, A.I. y Vasil'yev, G.V. (1962): Geological conditions of formation of bottom sediments in Karabogaz-Gol in connection with fluctuations of the Caspian Sea level. *Amer. Geol. Institute translation of Izvestiya Acad. Sci. URRS, Geol. Serv.*, 3: 79-86. En: *Marine Evaporites. Origin, Diagenesis and Geochemistry* (Kirkland, D.W. y Evans, R., Eds.), 1973, *Benchman Papers in Geology*. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Stroudsburg, Pennsylvania: 9-16.
- Eugster, H.P. y Hardie, L.A. (1978): Saline Lakes. En: *Lakes: Chemistry, Geology, Physics* (Lerman, A., Ed). *Springer-Verlag*, New York, 237-293.
- Fernández-Nieto, C. y Galán, E. (1979): Mineralogía de los depósitos de sales de Remolinos (Zaragoza). *Soc. Esp. Miner., Volumen Extra 1*: 51-65.
- García del Cura, M.A., Ordóñez, S. y López Aguayo, F. (1979): Estudio petrológico de la "Unidad Salina" de la Cuenca del Tajo. *Estudios Geol.*, 35: 325-339.
- García del Cura, M.A., Ordóñez, S. y Sánchez-Moral, S. (1992): Un yacimiento de glauberita en facies evaporíticas marginales: Mina Consuelo (San Martín de la Vega - Madrid). *III Congr. Geol. España, Salamanca*, Actas, t. 3: 372-377.
- García Veigas, F.J. (1993): *Geoquímica de inclusiones fluidas en formaciones salinas. Microanálisis Cryo-SEM-EDS*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, 260 p.
- García-Veigas, J., Ortí, F. y Fernández-Nieto, C. (1994): Modelo hidroquímico de sedimentación de glauberita-halita: sondeo PURASAL, Formación Yesos de Zaragoza (Mioceno Inferior, Cuenca del Ebro). *Geogaceta*, 16: 136-139.
- Grokhovskii, L.M. (1978): Glauberite as the source of sodium sulfate. *Lithol. Miner. Resour.* (New York), 12/3: 356-360.
- Gündogan, I y Helvacı, C. (1996): Geology, Hydrochemistry, Mineralogy and Economic Potential of the Bolluk Lake (Cihanbeyli-Konya) and the Adjacent Area. *Tr. J. of Earth Sci.*, 5: 91-104.

- Hardie, L.A. (1968): The origin of the recent non-marine evaporite deposit of Saline Valley, Inyo County, California. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 32: 1279-1301.
- Hardie, L.A. (1984): Evaporites: marine or non-marine? *Amer. Jour. Sci.*, 284: 193-240.
- Harvie, C.E. y Weare, J.H. (1980): The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O system from zero to high concentration at 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 981-997.
- Harvie, C.E., Weare, J.H., Hardie, L.A. y Eugster, H.P. (1980): Evaporation of seawater: calculated mineral sequences. *Science*, 208: 498-500.
- Kurilenko, V.V., Ruday, I.G. y Shavarts, A.A. (1988): The origin and commercial exploitation of subsurface brines in the northern half of Kara-Bogaz-Gol. *Inter. Geol. Reviews*, 30: 1238-1245.
- Lascorz, A., Inglès, M. y Ortí, F. (1991): Contribución al conocimiento de las sales sódicas del Mioceno de la cuenca del Tajo en el sector al NE de Esquivias. *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 14: 124-125.
- Lascorz, A. y Ortí, F. (1993): Petrología y geoquímica de glauberitas y yesos secundarios en el sector de Esquivias-Añover (Mioceno, cuenca de Madrid). *Bol. Soc. Esp. Miner.*, 16: 45-46.
- Last, W.M. (1994): Deep-water evaporite mineral formation in lakes of Western Canada. En: *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes* (Renaut, R.W. y Last, W.M., Eds.). *SEPM Spec. Publ.* 50: 51-59.
- López, P.L., Auqué, L.F., Garcés, I. y Chong, G. (1999): Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamara, Chile. *Rev. Geol. Chile*, 26: 89-108.
- Lowenstein, T.K., Jianren Li, Brown, Ch., Roberts, S.M., The-Lung Ku, Shangde Luo y Wenbo Yang (1999): 200 k.y. paleoclimate record from Death Valley salt core. *Geology*, 27: 3-6.
- Mandado, J. (1987): *Litofacies yesíferas del Sector Aragonés de la Cuenca Terciaria del Ebro. Petrogénesis y geoquímica*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 443 p.
- Mees, F. (1998): The alteration of glauberite in lacustrine deposits of the Taoudenni-Agorgott basin, northern Mali. *Sedim. Geol.*, 117: 193-205.
- Mees, F. (1999): Textural features of Holocene perennial saline lake deposits of the Taoudenni-Agorgott basin, northern Mali. *Sedim. Geol.*, 127: 65-84.
- Mendiña, J., Ordóñez, S. y García del Cura, M.A. (1984): Geología del yacimiento de glauberita de Cerezo de Río Tiron (provincia de Burgos). *Bol. Geol. Minero*, 95: 33-51.
- Ordóñez, S., Calvo, J.P., García del Cura, M.A., Alonso Zarra, A.M. y Hoyos, M. (1991): Sedimentology of sodium sulphate and special clays from the Tertiary Madrid Basin (Spain). En: *Lacustrine Facies Analysis* (Anadón, P., Cabrera, L. y Kelts, K., Eds.), *Spec. Publ. Intern. Assoc. Sediment.*, 13: 37-53.
- Ordóñez, S. y García del Cura, M.A. (1992): El sulfato sódico natural en España: las sales sódicas de la cuenca de Madrid. En: *Recursos minerales de España* (García Guinea, J. y Martínez Frías, J., Eds.). *C.S.I.C., Textos Universitarios*, 15: 24901229-1250.
- Ordóñez, S. y García del Cura, M.A. (1994): Deposition and diagenesis of sodium-calcium sulfate salts in the Tertiary saline lakes of the Madrid Basin, Spain. En: *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes* (Renaut, R.W. y Last, W.M., Eds.), *SEPM Spec. Publ.*, 50: 229-228.
- Ordóñez, S., López Aguayo, F. y García del Cura, M.A. (1977): Contribución al conocimiento de la mineralogía del yacimiento de sales de Villarrubia de Santiago (Toledo). *Estudios Geol.*, 33: 167-171.
- Ordóñez, S., Mendiña, J. y García del Cura, M.A. (1982): El sulfato sódico natural en España. *Tecniterrae*, 46: 16-32.
- Ortí, F. (1997): Evaporitic sedimentation in the South Pyrenean Foredeeps and the Ebro Basin during the Tertiary: a general view. En: *Sedimentary Deposition in Rift and Foreland Basins in France and Spain* (Busson, G. y Schreiber, B.C., Eds.), *Columbia University Press*, New York, 319-334.
- Ortí, F. y Helvací, C. (1995): Glauberita-Thenardita de la Formación Kirmir (Neógeno, Cuenca Bey pazari, Turquía). *Geogaceta*, 18: 187-190.
- Ortí, F., Pueyo, J.J. y San Miguel, A. (1979): Petrogénesis del yacimiento de sales sódicas de Villarrubia de Santiago, Toledo (Terciario continental de la cuenca del Tajo). *Bol. Geol. Minero*, 94: 347-373.
- Ortí, F. y Pueyo, J.J. (1980): Polihalita diagenética en una secuencia evaporítica continental (Mioceno, Cuenca del Tajo, España). *Rev. Inst. Inv. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 34: 209-222.
- Ortí, F. y Rosell, L. (1991): Prácticas de petrografía de rocas sulfatadas evaporíticas. En: *Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos* (Pueyo, J.J., ed.). *Universitat de Barcelona, Estudi General*, 2: 87-118.
- Ortí, F. y Rosell, L. (1994): Origen glauberítico del cuerpo central de los Yesos de Calatayud. *Comunicaciones II Congreso del G.E.T.* (Muñoz, A., González, A. y Pérez, A., Eds.), *Simpósio (I.G.C.P. n° 324)*: 255-258.
- Ortí, F. y Rosell, L. (1997): Sulfatos evaporíticos de interés petrológico. En: *Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada* (Melgarejo, J-C., Ed.). *Universitat de Barcelona-Fundació Folch*: 211-235.
- Ortí, F. y Rosell, L. (1998): Unidades evaporíticas de la cuenca de Calatayud (Mioceno inferior-medio, Zaragoza). *Geogaceta*, 23: 111-114.
- Ortí, F. y Rosell, L. (2000): Evaporative systems and diagenetic patterns in the Calatayud Basin (Miocene, central Spain). *Sedimentology*, v. 47: 665-686
- Ortí, F., Rosell, L. y Lascorz, A. (1995): Fábricas cristalinas del yeso secundario de reemplazamiento de glauberita: aplicación en prospección de sulfato sódico. *Geogaceta*, 17: 49-52.
- Ortí, F. y Salvany, J.M. (1991): Depósitos de glauberita en España: aspectos sedimentológicos y petrogenéticos generales. En: *Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos* (Pueyo, J.J., ed.). *Universitat de Barcelona, Estudi General*, 2: 193-230.
- Ortí, F., Salvany, J.M., Rosell, L. y Inglès, M. (1989): Sistemas lacustres evaporíticos del Terciario de la Cuenca del Ebro. *Geogaceta*, 6: 103-104.
- Pueyo, J.J. y De la Peña, J.A. (1991): Los lagos salinos españoles. Sedimentología, hidroquímica y diagénesis. En: *Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos* (Pueyo, J.J., ed.). *Universitat de Barcelona, Estudi General*, 2: 163-192.
- Rodríguez Aranda, J.P. y Calvo, J.P. (1998): Trace fossils and rhizoliths as a tool for sedimentological and palaeoenvironmental analysis of ancient continental evaporite successions. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 140: 383-399.
- Salvany, J. M. (1989): *Las formaciones evaporíticas del Ter-*

- ciario continental de la cuenca del Ebro en Navarra y la Rioja. Litoestratigrafía, petrología y sedimentología*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, 397 p.
- Salvany, J.M., Muñoz, A. y Pérez, A. (1994): Nonmarine evaporitic sedimentation and associated diagenetic processes of the southwestern margin of the Ebro Basin (Lower Miocene, Spain). *J. Sedim. Res.*, A64: 190-203.
- Salvany, J.M. y Ortí, F. (1994): Miocene glauberite deposits of Alcanadre: sedimentary and diagenetic processes (lower Miocene, Ebro Basin, Spain). En: *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes* (Renaut, R.W. y Last, W.M., Eds.) *SEPM Spec. Publ.*, 50: 203-215.
- Smoot, J.P. y Castens-Seidell, B. (1994): Sedimentary features produced by efflorescent salt crusts, Saline Valley and Death Valley, California. En: *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes* (Renaut, R.W. y Last, W.M., Eds.) *SEPM Spec. Publ.*, 50: 73-90.
- Smoot, J.P. y Lowenstein, T.K. (1991): Depositional environments of non-marine evaporites. En: *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources* (Melvin, J.L., ed.). Elsevier Science Publ. B.V., *Develop. Sedim.*, 50: 189-347.
- Strakhov, N.M. (1970): *Principles of lithogenesis, vol. 3*. Oliver & Boyd, Edinburgh, 577 p.
- Utrilla, R., Ortí, F., Pierre, C. y Pueyo, J.J. (1991): Composición isotópica de las evaporitas terciarias continentales de la Cuenca del Ebro: relación con los ambientes deposicionales. *Rev. Soc. Geol. España*, 4: 355-362.
- Utrilla, R., Pierre, C., Ortí, F. y Pueyo, J.J. (1992): Oxygen and sulphur isotope compositions as indicators of the origin of Mesozoic and Cenozoic evaporites from Spain. *Chem. Geol. (Isot. Geoscience Sect.)*, 102: 229-244.
- Valyashko, M.G. (1972a): Scientific works in the field of geochemistry and the genesis of salt deposits in the USSR. En: *Geologie of Saline Deposits* (Richter-Bernburg, G., ed.). *Proceedings of the Hannover Symposium, 15-21 May 1968*. UNESCO, Paris: 289-316.
- Valyashko, M.G. (1972b): Playa lakes –a necessary stage in the development of a salt-bearing basin. En: *Geologie of Saline Deposits* (Richter-Bernburg, G., ed.). *Proceedings of the Hannover Symposium, 15-21 May 1968*. UNESCO, Paris: 41-51.

Manuscrito recibido el 30 de Marzo de 2000

Aceptado el manuscrito revisado el 11 de junio de 2000