

DEPOSITOS EVAPORITICOS EN ESPAÑA: ASPECTOS GEOLOGICOS Y RECURSOS

F. ORTÍ, L. ROSELL y J. M. SALVANY
Dpto. Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica
Facultad de Geología, Universidad de Barcelona
Zona Universitaria de Pedralbes, 08071 Barcelona

INTRODUCCION

Objetivos y antecedentes

El presente artículo aspira a ser una introducción al conocimiento de los tipos más corrientes de recursos geológicos disponibles en las formaciones evaporíticas existentes en nuestro país. El volumen y reparto tanto geográfico como estratigráfico de estos depósitos en la España peninsular y balear es tan amplio, que en absoluto podemos pensar en hacer aquí un tratamiento exhaustivo de este tema.

Por ello nos centramos principalmente en algunos comentarios sobre los sulfatos cálcicos, la sal común y las potasas. Adicionalmente, haremos algunas referencias a las formaciones de sulfatos sódicos, aunque este tema es desarrollado con amplitud en otros trabajos del presente volumen.

A lo largo de nuestro trabajo el enfoque será principalmente geológico, más que propiamente geoeconómico, aunque se insistirá en los diversos aspectos (mineralógicos, sedimentológicos, diagenéticos, petrográficos, etc.) que creemos deben ser resaltados por su repercusión en la aplicación industrial de los materiales, o bien por ser un criterio de prospección bien definido.

En relación con trabajos ya existentes de investigación e inventario de recursos en las formaciones evaporíticas españolas, así como de publicaciones que consideran estos materiales con una visión general, cabe citar los antecedentes siguientes:

- La síntesis de J. M. Ríos sobre «Los materiales salinos del suelo español», presentada a la Conferencia Internacional de Depósitos Salinos de Houston (Texas), celebrada en 1962. Esta síntesis fue publicada en inglés como una contribución al *Special Paper* n. 88 de la Geol. Soc. Amer. (1968), y editada en castellano como la Memoria n.º 64 del IGME (1963). Además del enorme interés de esta síntesis, es también de resaltar su mapa de criaderos salinos españoles.

- El «I Coloquio Internacional sobre Obras Públicas en los terrenos yesíferos», celebrado en Madrid en 1962, que fue publicado en una serie de volúmenes por el Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas. De dichas publicaciones es de resaltar la síntesis de F. Macau y O. Riba titulada «Situación, características y extensión de los terrenos yesíferos en España», que viene acompañada de mapas litológicos a escala 1:2.000.000 y 1:500.000.
- El «Plan Nacional de Investigación de Yesos. Inventario de Recursos», presentado por el IGME en 1967 dentro del Plan Nacional de Investigación Minera, del Ministerio de Industria, y que fue desarrollado sectorialmente en diversas fases a partir de 1970. Para el conocimiento regional de las formaciones y canteras de yesos, así como de la calidad de los mismos, la consulta de los diferentes volúmenes de este plan nacional resulta totalmente indispensable.
- En la actualidad cabe destacar los programas de investigación en formaciones evaporíticas desarrollados por ENRESA, encaminados a obtener un inventario nacional de formaciones geológicas favorables para el almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad.
- Debe también hacerse referencia a la importante actividad sostenida por numerosas empresas estatales, paraestatales o privadas, así como por algunas Comunidades Autónomas, encaminadas a establecer el inventario de determinados aspectos de las formaciones evaporíticas (masas salinas, estructuras diapíricas, formaciones yesíferas explotables, etc.). Sólo a título de ejemplo, citaremos el «Programa de Investigación de las formaciones evaporíticas en Navarra», desarrollado por el Servicio de Recursos Hidrológicos y Geología del Gobierno de Navarra, entre 1984 y 1986. Desgraciadamente, la mayoría de estas investigaciones de empresas y organismos públicos permanecen como memorias inéditas.

Además de las antes citadas, algunas otras monografías que dedican cierta atención a nuestros recursos en formaciones evaporíticas son las siguientes:

- «Los minerales y rocas de aplicación industrial en España» (1976), realizada por el IGME en colaboración con varias empresas.
- «Monografías de sustancias minerales», de la Colección-Informe del IGME. De ellas, cabe citar las de «Sal gema» (1975), y «Sales potásicas» (1977).
- «Depósitos minerales de España» (1983), de F. Vázquez Guzmán, publicada por el IGME.
- Revista *Tecniterrae*, n.º 46 (1982).
- «Depósitos evaporíticos del Paleógeno y Mioceno de la cuenca del Ebro y antepaís pirenaico», de Ortí *et al.* (1989a) (in G. Bussón and Ch. Schreiber, eds.).
- «Panorama Minero, 1986» (I.G.M.E., 1986).

En nuestro escrito el conjunto de los principales recursos evaporíticos ha querido considerarse como un artículo único, porque así lo recomienda el enfoque homogéneo que deseamos darle. No puede olvidarse que las diferentes sustancias evaporíticas de interés económico no son, por lo general, formaciones aisladas e independientes entre sí, sino que constituyen una unidad de facies y se ordenan en cinturones litológicos según el gradiente de concentración en una determinada cuenca evaporítica.

Principales sustancias de interés económico de las formaciones y ambientes evaporíticos

Los materiales de interés económico producidos por los ambientes sedimentarios evaporíticos, ya sea antiguos o actuales, son muy diversos, como nos muestra un simple listado de los mismos. Entre las sustancias sólidas cabe destacar:

1. Sulfatos cálcicos (yeso, anhidrita), tanto de formaciones marinas como continentales.
2. Cloruro sódico (sal común, sal gema), marino o continental.
3. Minerales potásicos («potasas»), principalmente los cloruros silvita y carnalita de los ambientes marinos.
4. Sulfatos sódicos o sódico-cálcicos (thenardita, mirabilita, glauberita) y magnésicos (epsomita, hexahidrita, etc.), de los ambientes y formaciones continentales.
5. Azufre elemental, ligado a formaciones evaporíticas, así como a sus estructuras diapíricas asociadas («cap-rocks»).
6. Boratos y nitratos, de determinados ambientes continentales extremadamente áridos.
7. Sulfuros metálicos, asociados a determinadas facies preevaporíticas marinas, así como a algunas estructuras diapíricas como depósitos singenéticos en sus bordes.
8. Sulfatos de Ba y Sr (celestina, baritina, etc.), en relación principalmente con bordes de cuenca marinos.
9. Carbonatos alcalinos (trona, natron, etc.), de ambientes lacustres alcalinos.
10. Arcillas fibrosas (sepiolitas, attapulgitas), generadas en determinados ambientes continentales.
11. Diatomitas (preevaporíticas, en general), ya sean de «upwelling» (marinas) o de centro de cubeta, y estas últimas tanto marinas como lacustres; otros productos silíceos son también de interés, como los sílex nodulares.

Entre las sustancias fluidas merece citarse:

1. Salmueras de quimismos diversos, de las formaciones actuales o del Pleistoceno; son de interés tanto por las sales que contienen como por determinados elementos en los que se encuentran eventualmente enriquecidas (bromo, boro, litio, potasio). Igualmente, en su migración lateral hacia fuera de cuenca, algunas salmueras procedentes de formaciones evaporíticas antiguas han podido dar lugar en determinados casos a yacimientos de sulfuros metálicos del tipo «Mississippi Valley».
2. Hidrocarburos gaseosos, líquidos (petróleos, pizarras bituminosas), o sólidos (asfaltos), propios de las facies preevaporíticas.

Cabe también resaltar, en hidrogeología, el papel desarrollado por las grandes estructuras diapíricas, como sistemas de drenaje regional de acuíferos profundos. Igualmente, en las regiones afectadas por un alto grado geotérmico y/o hidrotermalismo, tanto las salmueras como las formaciones sulfatadas pueden dar lugar en profundidad a mineralizaciones de sulfuros metálicos.

Independientemente de los anteriores productos citados, las formaciones evaporíticas han cobrado en los últimos decenios una importancia fundamental por su buena calidad como *almacén de sustancias* diversas, tanto sólidas como fluidas. Ello es debido fundamentalmente a la perfecta estanqueidad y condiciones anhidras del interior de sus masas cristalinas, tanto en formaciones estratiformes como en los domos. De ambas formaciones puede realizarse, con cierta facilidad, su vaciado parcial por disolución controlada. Formaciones salinas a profundidades comprendidas entre 1.000 y 1.500 m respecto al suelo están siendo explotadas, o simplemente tratadas, en diversos países en la actualidad. Por otro lado, es creciente el interés de las masas salinas profundas como *recurso energético*, debido a la alta conductividad térmica de la sal y a la significativa anomalía térmica que producen. Según ello, dichas masas pueden llegar a actuar como un transmisor vertical de calor. Todos estos hechos nos obligan a ampliar el concepto de «recursos en sal» también a las formaciones profundas, y no simplemente a las más superficiales que son de fácil acceso por los sistemas mineros tradicionales. Como ejemplo gráfico, la figura 1 ofrece un simple esquema de algunos de los referidos productos precipitados en una cuenca marina.

En España los principales materiales evaporíticos (o íntimamente asociados a evaporitas) de interés económico de que disponemos en las formaciones geológicas antiguas son los siguientes:

- Sulfatos cálcicos y sal gema, en numerosas formaciones del ciclo alpino, tanto marinas como continentales.
- Potasas eocenas de la zona surpirenaica.

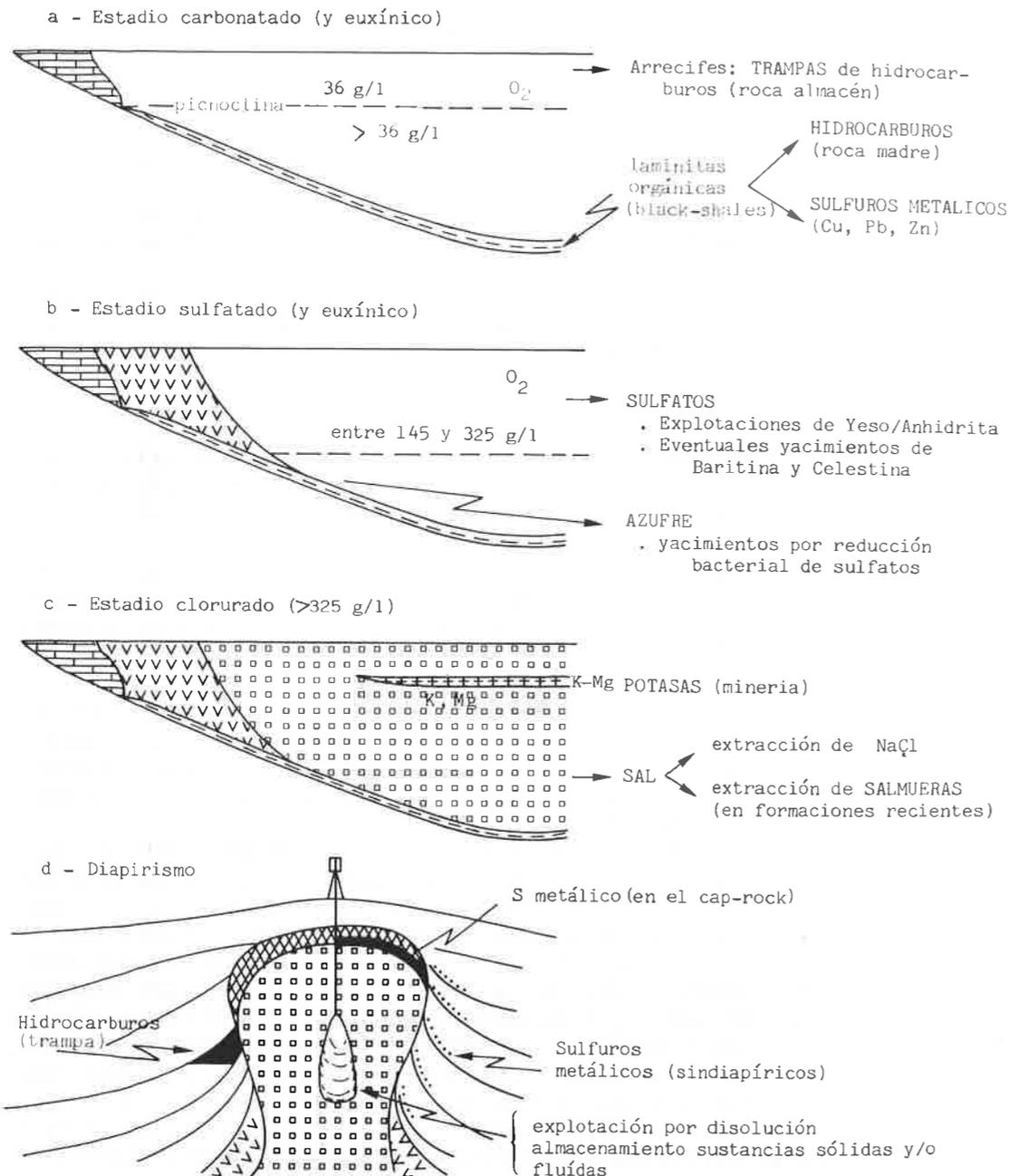


FIG. 1. Productos sedimentarios y diagenéticos de interés económico en relación con las fases de relleno de una cuenca evaporítica, y de su eventual deformación diapírica. Se indica también algunos otros usos y efectos de los diapiros (d). (Adaptado de Ortí, 1987b, fig. 2.)

- Sulfatos sódicos y sódico-cálcicos en los Terciarios de diversas cuencas continentales (Tajo, Ebro...).
- Azufre elemental, ligado a formaciones del Mioceno, tanto marinas (ej.: Lorca) como continentales (ej.: Hellín, Libros).
- Sílex en numerosas formaciones continentales terciarias, tanto en sus sulfatos cálcicos como en sus carbonatos evaporíticos.
- Diatomitas marinas del Neógeno de las Cordilleras Béticas, en relación con algunas formaciones evaporíticas.

Ciertas sustancias de las formaciones antiguas tienen también buenas perspectivas de ser utilizadas, como las pizarras bituminosas y los petróleos, tanto de formaciones evaporíticas marinas como continentales.

Adicionalmente, otros productos son o han sido beneficiados de los ambientes actuales:

- Cloruro sódico de las salinas marítimas actuales, y sus lejías residuales, incluyendo la obtención de determinados elementos como el bromo.
- Sulfatos magnésicos y sódicos, así como sus salmueras, de algunas lagunas y salinas de diversas zonas endorreicas actuales.

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS SULFATOS CALCICOS Y LOS CLORUROS

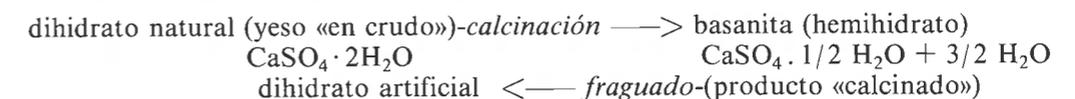
Aspectos geoeconómicos de los sulfatos cálcicos

Las formaciones de yeso son sin duda las rocas evaporíticas más extensamente repartidas en la superficie de nuestro país, así como en profundidad lo son las formaciones anhidriticas.

La producción mundial de yeso (+ anhidrita) de 1981 fue de 68.700.000 tons, según el Instituto de Ciencias Geológicas de Londres, de las cuales correspondieron a España unas 5.200.000 tons, ocupando el quinto puesto de la producción. Es significativo, sin embargo, que el máximo productor, USA, únicamente duplicó (10.430.000 tons) la producción española en ese año.

La producción mundial estimada de yeso en 1986 ascendió a casi $84 \cdot 10^6$ tons (I.G.M.E., 1986), de los que corresponden a España 5.062.941 tons (aproximadamente el 6,5%). Por provincias, los primeros lugares en producción mineral corresponden a: Almería (1.390.564 tons), Barcelona (323.076 tons), Castellón (323.076 tons), Toledo (313.107 tons), Madrid (310.294 tons), Gerona (290.577 tons) y Zaragoza (272.060 tons), aunque en valor económico la lista se inicia por Zaragoza, Almería y Madrid.

Como es sabido, la propiedad fundamental que posee el yeso para su utilización en la construcción es la de poder perder las 3/4 partes de su agua de composición en la calcinación a $120-125^\circ\text{C}$, con la obtención del hemihidrato o basanita, que a su vez tiene la propiedad de rehidratarse a la temperatura ambiente:



Las aplicaciones del yeso son muy variadas, ya sea calcinado o en crudo:

- Construcción (albañilería, recubrimientos, aglomerante, estucos, prefabricados, etc.) como yeso calcinado, o como yeso crudo (retardador del fraguado de algunos cementos).
- Agricultura (corrector de suelos, fertilizante, mejora de abonos), como yeso crudo.
- Industria química (fabricación de sulfato amónico, azufre y ácido sulfúrico) y en la obtención de vidrio, papel, pinturas y algodón.

- d) Industria farmacéutica (como elemento de carga de drogas e insecticidas), como yeso crudo.
- e) Ornamentación (talla de alabastros), como roca.
- f) Minería del carbón (reducción de los efectos de explosiones y riesgos de silicosis), como yeso crudo.
- g) Medicina (escayola en trabajos dentales y de traumatología), como yeso calcinado.
- h) Alimentación (para dar dureza al agua en la fabricación de cerveza, en la clasificación de vinos, en piensos de ganado, etc.), como yeso crudo.
- i) Imprenta, cerámica, orfebrería y galvanoplastia, como yeso calcinado.

En algunos países también se utiliza la roca anhidrita natural (sulfato cálcico anhidro) para diversos fines industriales, pero en España tiene pocas aplicaciones, por el momento.

Sánchez Jiménez (1979) estima que los porcentajes de utilización del yeso en España son los siguientes: en construcción el 65 %, en industria el 25 % y en agricultura el 10 %. La clasificación de los tipos comerciales de yeso se basa en diversos factores, como: índice de pureza (contenido en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), finura de molido, resistencia mecánica a la flexotracción, tiempo de fraguado, ensayo de fases, cantidad de yeso correspondiente al amasado o saturación, etc. La normativa española de estas características viene especificada en el «Pliego General de Condiciones para la recepción de yesos y escayolas en las obras de construcción» (BOE n.º 28, del 2-2-1972). La figura 2 muestra un posible esquema de método analítico utilizado para la valoración de las muestras de yeso de cantera. En construcción los yesos de mayor pureza se utilizan para la fabricación de las escayolas.

El Plan Nacional de Investigación de Yesos, iniciado por el IGME hacia 1967, ha estudiado sucesivamente diversas regiones (Centro, Cataluña, Sureste, Levante, Ebro-Duero, Andalucía, Asturias, Vasco-Cantábrica). Se ha definido cerca de un centenar de buenos yacimientos, con leyes entre 75 y 95 % en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, con unas reservas próximas a 10^{10} m^3 . En la última fase ha sido estudiado el País Vasco-Cantábrico (1986-87).

La anhidrita, como roca, no es explotada en España, a pesar de los numerosos afloramientos de la misma en relación con canteras de yeso ya existentes, y de los indicios de la proximidad a superficie que se encuentran en muchas formaciones geológicas de sulfato cálcico.

Aspectos geológicos del sulfato cálcico

La enorme importancia de la producción de yeso en España, como acabamos de ver, justifica el que dediquemos alguna atención a la adecuada caracterización petrológica y sedimentológica de sus diferentes tipologías de yacimiento.

Sedimentación. Las formaciones sedimentarias de sulfato cálcico son, principalmente:

1. Como yeso «primario», que precipita en una gran diversidad de ambientes marinos o continentales, tanto en cuerpos de agua libre (primarios s.s.) como intersticialmente entre los sedimentos no evaporíticos (primario intersticial, sinsedimentario o diagenético temprano).
2. Como anhidrita «diagenética temprana», en crecimientos intersticiales entre los materiales encajantes. En tales casos, o bien crece de un modo directo en el seno de éstos, dando masas nodulosas, o bien reemplaza a yesos precursores. Algunos autores consideran que también la anhidrita, al igual que el yeso, pudo precipitar directamente de las salmueras libres en las cuencas del pasado geológico, a altas concentraciones de cloruros. Existe una extensa bibliografía sobre el tránsito yeso-anhidrita, en función de diversos parámetros (T, P, actividad del agua, etc.).

Ciclo de transformaciones. Con el tiempo geológico los depósitos de sulfato cálcico suelen experimentar un conjunto de transformaciones diagenéticas conocidas como «ciclo del sulfato cálcico». Este consiste, en esencia, en:

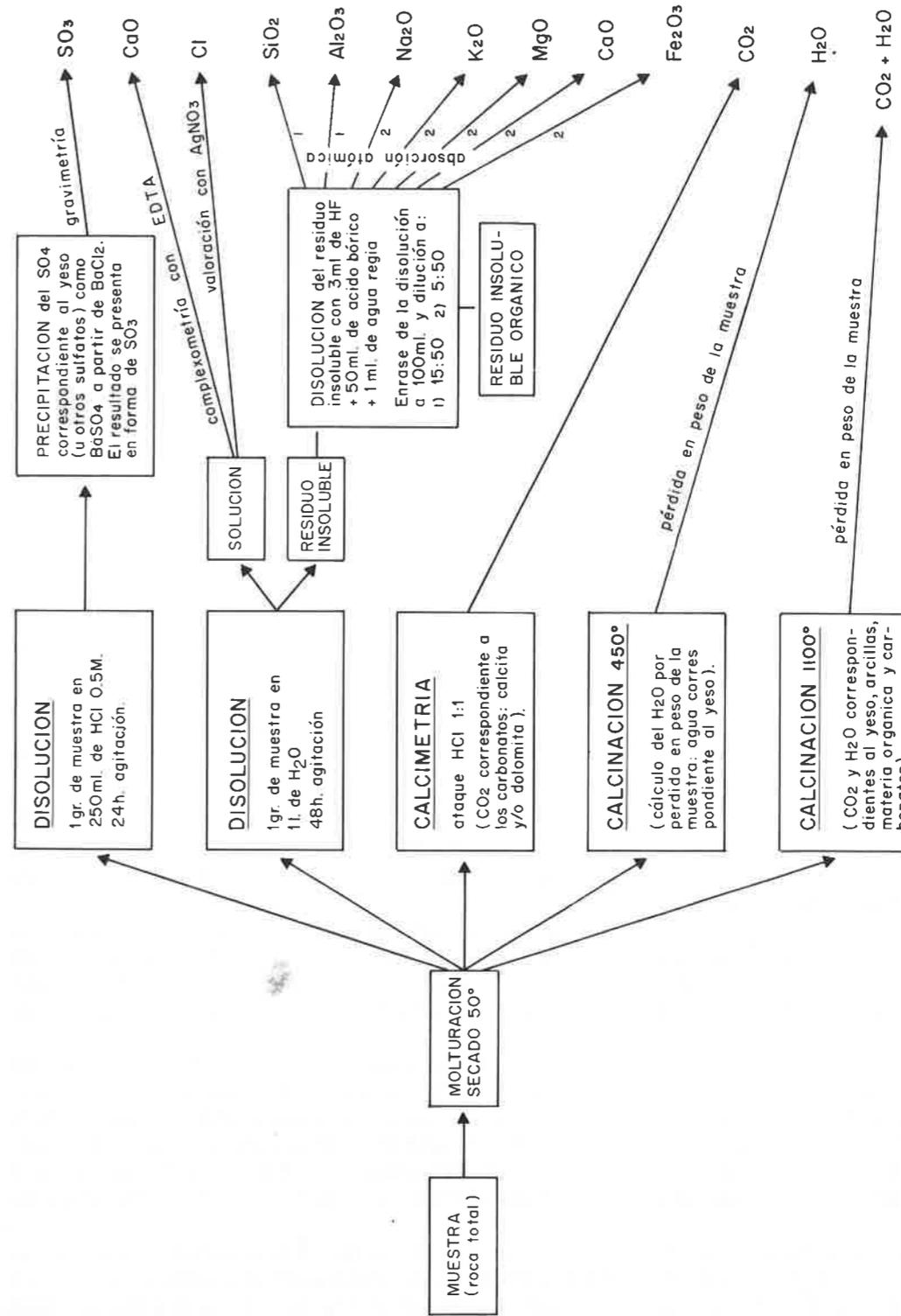


Fig. 2. Cuadro esquemático de un posible método de análisis químico a seguir para la valoración de las muestras de yeso de cantera (según Salvany, 1989).

1. La anhidritización en profundidad del yeso primario depositado en superficie (anhidrita de reemplazamiento profundo), y
2. La rehidratación con la exhumación final de toda la anhidrita, tanto la de origen diagenético temprano como la procedente de la deshidratación en profundidad antes referida, hacia el tipo de yeso que llamaremos «secundario».

Mecanismos de estas transformaciones. Estos procesos de hidratación y deshidratación nunca ocurren en sistemas cerrados. En teoría, y si se consideran los volúmenes molares, la deshidratación del yeso en anhidrita implica una reducción volumétrica próxima al 38 %, mientras que este mismo volumen se ganaría en la reacción opuesta. En la práctica, lo que se observa es lo siguiente:

- a) En la deshidratación del yeso con la subsidencia: la pérdida de volumen puede quedar absorbida por la compactación. Sin embargo, también es frecuente encontrar formaciones de grandes cristales de yesos primarios que han quedado perfectamente pseudomorfizados en anhidrita, por lo que en el sistema han entrado soluciones saturadas adicionales que han permitido la preservación isovolumétrica del depósito yesífero original.
- b) En la hidratación final de la anhidrita en yeso secundario: suele haber una perfecta preservación de las litofacies anhidriticas, por lo que la reacción ocurre de un modo isovolumétrico. El exceso de sulfato cálcico generado de este modo es eliminado en solución de la formación, y se puede depositar como venas fibrosas en las formaciones encajantes. Petrográficamente el modelo de hidratación suele ocurrir por fracturas o venas, por bandas concéntricas, o como un frente homogéneo.

El último punto (hidratación isovolumétrica) es importante desde un punto de vista conceptual, y la antigua idea de que las rocas y formaciones anhidriticas se hinchan y deforman catastróficamente al hidratarse en subsuperficie a yeso secundario, no tiene justificación petrográfica. Todas las estructuras de deformación observables en las rocas de yeso secundario, y que suelen ser atribuidas a este proceso, están ya contenidas en la roca anhidritica precursora, o bien tienen su origen en causas tectónicas o halocinéticas, sincrónicas o posteriores al proceso de hidratación, como demuestra el estudio de numerosas formaciones anhidriticas en sondeos.

Litofacies de los sulfatos cálcicos. De lo dicho hasta aquí se deduce que no puede estudiarse con sentido geológico un yacimiento de yeso sin conocer adecuadamente su historia diagenética. Para ello resulta imprescindible el previo conocimiento de las litofacies propias de cada fase mineral.

Los *yesos primarios* suelen presentar, al depositarse o cristalizar, las siguientes litofacies: laminada (mm) (L), bandeada (cm) (B), selenítica (> 2 mm) (S), estromatolítica (E), nodular (N), meganodular (MN), microlenticular masiva mL, que suele presentarse bioturbada en diferentes grados, macrolenticular intersticial (I), así como detríticas (D) de muy diversa índole (entre ellas la turbidítica).

Las *anhidritas* de diagénesis temprana suelen desarrollar como litofacies propias las nodulares y contorsionadas (enterolíticas), aunque cuando reemplazan al yeso primario pueden preservar en mayor o menor grado sus litofacies (laminada, selenítica pseudomórfica, etc.). En la anhidritización en profundidad también pueden darse dos casos extremos: 1) preservación completa de las litofacies del yeso primario, o bien 2) su destrucción por aparición de las litofacies nodulares reemplazantes propias de la anhidrita (anhidritización destructiva).

Los *yesos secundarios* respetan estrictamente las litofacies de la anhidrita precursora, ya fueran éstas propias de ella o bien heredadas (preservadas) del yeso primario.

En una explotación, la no caracterización adecuada de un yacimiento de yeso secundario puede ocasionar que al profundizar en los frentes se encuentre la anhidrita, debiendo entonces ser abandonada la cantera. Este temor es injustificado en las formaciones

que son extensivamente de yeso primario. Ello no obstante, muchas formaciones del Mioceno en España pasan lateralmente de yesos primarios a yesos secundarios, con lo que persiste en ellas la posibilidad de encontrar anhidrita. En consecuencia, sus explotaciones deben estar perfectamente controladas con criterios sedimentológicos y petrológicos.

Texturas cristalinas. En la descripción textural de los yesos los tamaños cristalinos pueden subdividirse en tantas clases como se desee. Los autores del presente artículo dan a este aspecto una importancia muy subordinada al conocimiento del carácter primario o secundario de los mismos.

Para los *yesos primarios* (autóctonos o detríticos) puede distinguirse simplemente entre: yeso microcristalino (< 2 mm) y macrocristalino o selenítico (> 2 mm). Entre los primeros puede diferenciarse entre gipsarenitas (entre 1/16 y 2 mm) y gipsilitas (< 1/16 mm). El término gipsirrudita (> 2 mm) parece tener una connotación de depósito detrítico principalmente.

En las texturas de los *yesos secundarios* la distinción fundamental se da entre los tipos alabastrinos (variedades de grano fino, pero de tamaños variables), porfiroblásticos (cristales bien formados, de milimétricos a centimétricos), y megacristalinos (desde centímetros a metros) (Ortí, 1977). Las texturas de la anhidrita, aunque también muy variadas, pueden clasificarse en tipos equidimensionales (granulares, microgranulares) y prismáticos (Ortí y Rosell, 1981). En afloramiento la anhidrita se distingue fácilmente del yeso por su carácter opaco, frente al ligeramente translúcido de los yesos, además de por su mayor dureza y densidad.

Ciclos deposicionales. En las explotaciones, además del carácter primario o secundario del yeso, es útil el reconocimiento de posibles ciclos deposicionales en las capas de sulfatos cálcicos, en particular por su relación con las impurezas asociadas. Pueden presentarse ciclos: 1) de sabkha (facies laminadas basales y nodulares a techo); 2) de salina (facies nodulares basales y laminadas al techo); 3) de carbonatos basales-sulfatos al techo; 4) de lutitas basales-sulfatos al techo; 5) de yeso primario basal y secundario al techo; etc. Dentro de estos ciclos evaporíticos debe caracterizarse bien el desarrollo de los estériles (incluida la anhidrita) frente al yeso.

Pureza de los depósitos de sulfatos cálcicos. No existe, en nuestra experiencia, ningún ambiente sedimentario ni diagenético en el que, como norma, el sulfato cálcico sea de alta pureza. Aún así, esta afirmación debe ser matizada. *A priori*, podría pensarse que los sulfatos de centro de cuenca marina deben ser más puros que los continentales. Sin embargo, los primeros pueden ser mucho más delgados que estos últimos, y además contener abundante material bituminoso. Por su parte, los de borde de cuenca, que a veces son muy potentes, pueden estar contaminados por aportes detríticos y carbonatos. Sin embargo, en las cubetas someras o plataformas seleníticas los yesos pueden alcanzar alta pureza.

Los yesos de crecimiento intersticial suelen contener altos porcentajes de material encajante, aunque los cristales individuales (macrocristales) pueden ser grandes y extremadamente puros. Los que denominamos microlenticulares masivos, que suelen encontrarse más o menos bioturbados (gipsilitas y gipsarenitas de origen químico y ambiente lacustre somero), aunque con frecuencia son ricos en matriz no evaporítica, llegan sorprendentemente a porcentajes en sulfato cálcico superiores al 95 %.

Las diferentes variedades de yesos detríticos suelen ser de pobre calidad, debido a la matriz no evaporítica que incluyen. Sin embargo, existen en nuestro país numerosas canteras que los benefician.

Los yesos secundarios nodulares que proceden de las litofacies anhidriticas pueden llegar a ser los más puros y homogéneos en tamaño de grano, composición y color. Ello es debido al mecanismo propio del crecimiento nodular de la anhidrita, tanto sea desplazante como reemplazante. Puede distinguirse entre micronódulos (< 1 cm), macronódulos (entre 1 y 50 cm) y meganódulos (> 50 cm de diámetro). Los meganódulos son las piezas

preferidas para los alabastrinos, pero sólo son aptos para estos fines cuando se componen de yeso alabastrino de grano fino, de tal modo que muchas formaciones de meganódulos integrados por yeso secundario megacristalino han de ser destinadas a la fabricación de yesos o escayolas. Independientemente de estos hechos, y dado el carácter de crecimiento intrasedimentario de los nódulos, muchas formaciones nodulares son ricas en matriz encajante, y por ello de pobre calidad.

Como reflexión final a este apartado, puede decirse que es necesario caracterizar los depósitos de sulfato cálcico en el contexto general de cada cuenca evaporítica, distinguiendo en las cartografías las formaciones que nunca han sido anhidritizadas respecto de las que lo han sido, así como los grandes grupos de litofacies y su distribución en el sentido de los gradientes de concentración originales. Respecto a los yesos secundarios, la distinción entre las formaciones alabastrinas respecto de las megacristalinas puede orientar hacia determinados tipos de aplicaciones industriales de los yesos, y en particular ello es importante en las facies periféricas de meganódulos que desarrollan algunas grandes formaciones.

Para una síntesis general de los aspectos sedimentológicos y petrológicos de los sulfatos cálcicos y del cloruro sódico, entre otras muchas, puede consultarse la de Ortí (1989).

En resumen, existen siempre unos controles sedimentológicos y diagenéticos que han intervenido en la génesis de una determinada formación de sulfato cálcico, tal y como la encontramos en superficie o subsuperficie, y que condicionan su aplicación industrial. El estudio de estos controles, en el contexto de cada cuenca, es un paso necesario y previo a la prospección y explotación de la misma. En la actualidad, podemos considerar que existe ya un volumen de información geológica y geoeconómica suficiente para iniciar la caracterización industrial sistemática de las diferentes cuencas y formaciones yesíferas de nuestro país.

Aspectos geoeconómicos de la sal y las potasas

La producción mundial de sal en 1981 se estimó en 148.923 miles de tons, según el Instituto de Ciencias Geológicas de Londres. De ellas correspondieron a España 3.606 miles de tons, ocupando así nuestro país el puesto 15.^o de la producción mundial.

Ráfols (1984) refiere la siguiente estimación de la producción española de sal para el año antes referido:

1. Sal gema: en disolución	1.300 miles de tons
sólida	283 miles de tons
2. Sal marina	1.393 miles de tons
3. Sal de manantial	28 miles de tons
4. Sal residual del beneficio de minerales potásicos	717 miles de tons
TOTAL	3.721 miles de tons

De estos apartados, los números 1 y 3 corresponden a sal originada por las formaciones geológicas españolas, sumando un total de 1.611 miles de tons, frente a las 1.393 de las salinas marítimas actuales. Ello indica la importancia de estas últimas y justifica el que dediquemos en nuestro artículo alguna atención a las mismas. Por otro lado, su producción puede considerarse renovable, frente a la de las formaciones antiguas que no lo es (aunque en la práctica, las reservas en sal gema de nuestro país pueden ser consideradas como inagotables).

En el año 1986 la producción española de cloruro sódico fue de 3.106 miles de tons (I.G.M.E., 1986), de las que el 53,6% corresponde a sal marina, el 22,9% a sal gema, el 17,4% a la sal obtenida como subproducto de las sales potásicas, y el 6,1% restante a sal de manantial.

Las aplicaciones de la sal (cloruro sódico) son muy diversas:

- a) Industria química básica (electrólisis: carbonato sódico, sulfato sódico, etc.; industria del cloro y de la sosa cáustica) y diversificada (beneficio de cenizas de piritas;

aceites y grasas industriales; perfumería y jabón de tocador; lodos de perforación; acelerador de cementos especiales; eliminación en petróleos de compuestos de azufre; detergentes sintéticos; colorantes y pigmentos; barnices de cerámicas; textil y curtición; hielo; etc.).

- b) Metalúrgica (temple de metales; en la obtención del aluminio).
 c) Pesca y salazón de pescado.
 d) Agricultura y ganadería (alimentación, y como producto deshidratante).
 e) Ablandamiento de aguas, tanto a escala industrial como en los usos alimentarios y domésticos.
 f) Deshielo invernal y eliminación de nieve.
 g) Industria alimentaria (panificación, cárnica, conservas vegetales, láctea, aceituna, etc.)
 h) Consumo humano directo.

La legislación española y el proyecto de norma FAO/OMS imponen que la sal para la industria alimentaria sea un producto natural con un mínimo del 97% en NaCl, calculado sobre el producto seco, sin aditivos, y considerando que el 3% restante está integrado por otras sales naturales de interés fisiológico.

Por lo que se refiere a las potasas, la producción mundial para 1981 se cifró en 29.603.000 tons, correspondiendo a España el octavo lugar de producción, con 728.810 tons (K_2O), según el Instituto de Ciencias Geológicas de Londres.

Durante 1986 la producción de sales potásicas fue de 5.588.463 tons (I.G.M.E., 1986), con una ley del 60,0% de los minerales explotados y un contenido en K_2O de 749.586 tons. Durante el mismo año la producción de KCl fue de 1.169.920 tons, con un contenido en K_2O de 701.953 tons. Por orden de importancia, las empresas productoras fueron: Unión Explosivos Río Tinto (Barcelona), Potasas de Suria (Barcelona) y Potasas de Subiza (Navarra).

Su uso principal es como fertilizante en agricultura. Su mineral principal es la silvita (roca silvinitica, compuesta por una mezcla de silvita y halita). La carnalita es el segundo mineral potásico en orden de importancia extractiva.

El término «potasa» se refiere al óxido potásico, K_2O , que no se encuentra como tal en la naturaleza, ni existe tampoco como producto fabricado, pero sirve como compuesto de referencia para calcular la riqueza en potasio del mineral que se utiliza como materia prima para la obtención de dicho elemento. Así, por ejemplo, la silvita pura contiene el equivalente a 63,2% de K_2O . La procedencia del término se remonta a una antigua técnica mediante la cual se obtenía K_2CO_3 lixiviando cenizas de madera («ash») en una gran olla de hierro («pot») y dejando evaporar posteriormente.

Aunque existen en la naturaleza muchos minerales potásicos, son los yacimientos de origen evaporítico los únicos útiles para la producción de potasa. El mineral potásico más importante es la silvita (KCl). Otros minerales potásicos objeto de explotación son la carnalita, kainita, polihalita y langbeinita. De todos ellos, sólo silvita y carnalita se presentan en los yacimientos españoles en cantidades significativas. Los productos comerciales son el cloruro potásico y el sulfato potásico.

El 95% aproximadamente del consumo total de potasa es utilizado en la fabricación de fertilizantes, ya que el potasio tiene una vital importancia para el crecimiento de las plantas. El resto del consumo es absorbido por la industria química, donde el potasio es utilizado para la obtención de diferentes compuestos que se emplean en la producción de jabones y detergentes, preparados farmacéuticos, colorantes, cerillas, explosivos y fuegos artificiales, textiles, cerámicas, conservantes de alimentos, reactivos de laboratorio, etc.

Aspectos geológicos de la sal y las potasas

Los cloruros presentes en las formaciones evaporíticas españolas se limitan a la halita (NaCl), silvita (KCl) y carnalita ($MgKCl_3 \cdot 6 H_2O$). El primero de ellos se encuentra extensa-

mente repartido por las formaciones marinas (desde la base del Triásico hasta el techo del Mioceno) y las continentales (Paleógeno y Mioceno), mientras que los cloruros de K y Mg se encuentran limitados a las formaciones marinas del Eoceno.

En general, la *halita* puede sedimentarse en una gran variedad de ambientes deposicionales, desde los relativamente profundos a los muy someros, y con altas purezas en NaCl (> 97%), siendo también un depósito de posible producción natural controlada en nuestras latitudes, en las salinas costeras de evaporación. Los otros cloruros pueden también depositarse en una diversidad de medios evaporíticos, desde marinos (la mayoría de ellos) hasta lacustres (en determinados ambientes de extrema sequedad), pero no pueden ser obtenidos por evaporación en las costas españolas por insuficiencia de aridez.

En los yacimientos peninsulares la *halita* es un depósito principalmente bandeado, en capas de pocos milímetros a varios centímetros, incluso hasta el orden decimétrico, y sólo pierde este carácter deposicional básico en algunos bordes de cuenca, por problemas de disolución y reprecipitación, o en las zonas diapíricas o de intensa deformación estructural, donde ha podido recrystalizar. En este último proceso la sal tiende a aumentar el tamaño cristalino, al mismo tiempo que se purifica por la eliminación progresiva de impurezas en la fluencia, dada su alta plasticidad. En las facies bandeadas, las arcillas o las anhidritas marcan las diastemas (láminas de impurezas) y la ciclicidad.

Texturalmente la sal suele mostrar variedades ricas en inclusiones fluidas o bien libres de ellas. Estas últimas suelen corresponder a zonas de recrystalización y gran tamaño cristalino, o bien a zonas de precipitación en cavidades, donde hubo una disolución previa de la sal original: son, en definitiva, variedades de sal transparente, o «libre de inclusiones». Las variedades más corrientes, por el contrario, son las que preservan las inclusiones fluidas atrapadas durante el momento de la sedimentación, y que suelen disponerse en crecimiento zonado según las caras del cubo. Estas variedades de «sal con inclusiones», o translúcida, presentan cristales con diferentes morfologías: en cubos, en tolva (hopper), en pirámides (cubos o tolvas sobrecrecidas verticalmente: «en chevron»), en paralelepípedos rectangulares, etc., o bien en masas relativamente anhedrales o subhedrales y equigranulares. Aunque en las salinas de evaporación dominan los cristales de caras deprimidas o escalonadas (tolvas), presentando la capa de precipitación estival una porosidad elevada, en las formaciones antiguas los cristales de sal se han ido completando por sobrecrecimiento sintaxial, ya sea en el fondo de cuenca o en las primeras fases del enterramiento, por lo que resulta muy baja la porosidad de dichas formaciones una vez litificadas.

Aunque el alto contenido en inclusiones fluidas de la sal puede facilitar su fluencia ante los esfuerzos o ante un aumento de temperatura local o regional, la fluencia también ocurre fácilmente por la propia plasticidad de la sal. La elevada conductividad térmica de la roca sal gema es también una propiedad de gran interés geológico.

En bordes de cuenca o en cubetas muy someras sometidas a oscilaciones de la lámina de agua, la sal recrystaliza fácilmente dando lugar a variedades transparentes de crecimiento intrasedimentario y desplazante, en las que el bandeamiento original queda seriamente distorsionado (sal «caótica», fenoblástica o «arcillosa»).

GENERALIDADES SOBRE LAS FORMACIONES EVAPORITICAS EN ESPAÑA

Las formaciones evaporíticas son conocidas en la Península Ibérica y Baleares principalmente durante el ciclo alpino. Algunas intercalaciones yesíferas han sido citadas entre las unidades alóntonas (mantos) de las Cordilleras Béticas (Puga *et al.*, 1984-85), pero no tienen gran relevancia y son de difícil control estratigráfico. Y, recientemente, han sido localizados algunos cuerpos yesíferos entre los materiales continentales del Pérmico de Pirineos (B. Valero, com. pers., 1989). Aún así, el reparto cronoestratigráfico de las formaciones evaporíticas alpinas es muy amplio, desde la base del Triásico hasta la actualidad. Igualmente lo es su distribución espacial, ya que rodean ampliamente el centro peninsular

del Macizo Hespérico. En el momento de ocuparnos del conjunto de dichas formaciones, es conveniente hacer una primera separación entre las formaciones de origen marino frente a las de origen continental, ya que a su vez, las sustancias de interés económico acompañantes están claramente diferenciadas según estos dos tipos genéticos, como se ha podido ver a lo largo de la Introducción.

Formaciones de origen marino

Además del clima, otros factores (ambiente tectónico, oscilaciones del nivel oceánico, subsidencia en las cuencas, etc.) han controlado la aparición de dichas formaciones, que se han generado ininterrumpidamente a lo largo de las diferentes fases geodinámicas del ciclo alpino (rifting mesozoico, compresión paleógena, distensión y/o compresión neógena). Podemos agrupar dichas formaciones del siguiente modo:

- Evaporitas de la extensa plataforma triásica: son cubetas someras receptoras de sulfatos y cloruros (hasta 300 m de sal) que se precipitan tanto en transgresión (Röt, Keuper superior) como en regresión (Muschelkalk medio, Keuper inferior), bordeando toda la Meseta.
- Evaporitas de las sabkhas costeras jurásico-cretácicas: son llanuras supramareales y lagoons carbonatado-anhidríticos muy subsidentes, con potencias de anhidritas nodulares, y en menor proporción laminadas, que alcanzan desde 300 m (Cretácico superior de la Cordillera Ibérica) a 800 m (Lias basal de todo el ámbito periférico de la Meseta). Corresponden a fases regresivas.
- Evaporitas de la cuenca de antepaís surpirenaico eoceno: son surcos marinos residuales, relativamente profundos, en los que el relleno evaporítico marca la finalización de grandes ciclos sedimentarios de control tectónico. Son fases regresivas de carácter anhidrítico (100 m en el Eoceno medio) o clorurado (300 m de *halita* y potasas en el Eoceno superior).
- Evaporitas del sistema mediterráneo de fosas neógenas: son fosas y cuencas de intracadena afectadas por distensión o distensión-compresión. Precipitan sulfato cálcico sólo (Mioceno inferior del Penedés) o bien acompañado de ciertas cantidades de sal (cuencas del Tortoniense-Messiniense de la Cadena Bética).

La figura 3 resume la distribución estratigráfica y algunos de los aspectos litológicos más generales de estas formaciones marinas.

Formaciones de origen continental

A lo largo del Terciario la sedimentación evaporítica continental ha ocurrido en muchas de las cuencas endorreicas generadas durante las fases orogénicas principales del ciclo alpino. Dichas cuencas podemos considerarlas agrupadas del siguiente modo:

- a) Amplias depresiones de historia subsidente y continuada entre la compresión paleógena y la distensión neógena: se sedimentan evaporitas durante todo el Terciario en las cuencas intracratónicas del Ebro y del Tajo, con una compleja y característica paragénesis mineral. Menores cantidades de sulfatos de calcio se registran en la cuenca del Duero.
- b) Fosas de relleno principal neógeno: algunas fosas intramontañosas de la Cordillera Ibérica y Catalánides recogen una importante sedimentación de sulfato cálcico durante el Mioceno (y en mucha menor cantidad durante el Oligoceno): Vilobí del Penedés, Calatayud-Montalbán y Alfambra-Teruel.
- c) Cuencas de relleno principal ocurrido durante el Neógeno superior: algunas cuencas endorreicas de las Cordilleras Béticas recogen principalmente sulfato cálcico (Baza, Granada, etc.).

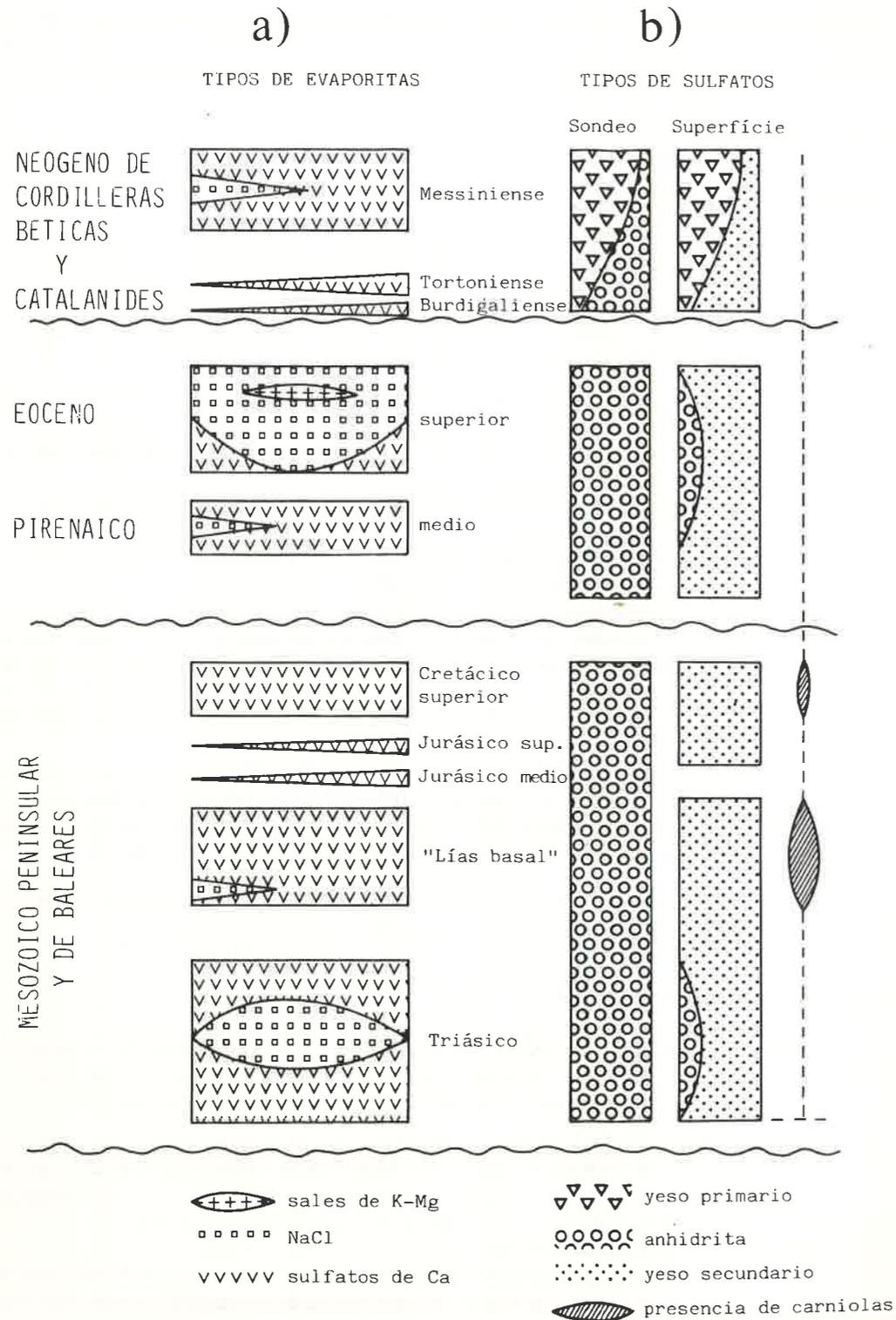


FIG. 3. A) Principales episodios evaporíticos marinos del ciclo alpino en la Península Ibérica y Baleares; B) Tipos de sulfatos cálcicos que incluyen dichos episodios, con indicación de las formaciones de colapsobrechas («carniolas») más extensamente desarrolladas que acompañan a estos sulfatos (modificado de Ortí, F., 1987b, fig. 1).

Unas observaciones generales de la sedimentación evaporítica de nuestros Terciarios continentales han sido ofrecidas en Ortí (1988).

Relación entre ambos tipos de formaciones

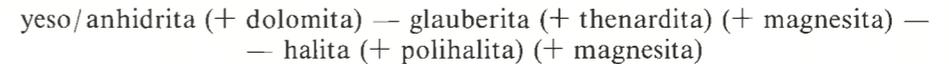
Crecientes datos sobre la composición isotópica de los sulfatos evaporíticos en España (Utrilla *et al.*, 1987; Utrilla, 1989) ponen de manifiesto la afinidad mesozoica de los yesos y anhidritas de los Terciarios continentales, vía reciclaje:

- a) procedencia triásica y del «Infralías» para las cuencas del Ebro, Calatayud, Teruel y Granada, entre otras;
- b) procedencia mixta triásico-jurásico-cretácica para la cuenca del Tajo (Madrid), y
- c) procedencia jurásico-cretácica para la Depresión Intermedia (Tajo oriental).

Además de estas afinidades con los sulfatos marinos mesozoicos, es también previsible el reciclaje dentro de cada cuenca de formaciones evaporíticas más antiguas de origen continental en otras más modernas (formaciones oligocenas en miocenas de la Cuenca del Ebro, formaciones paleógenas en las miocenas de la Cuenca del Tajo; etc.). Pero en estos casos las evidencias son del tipo sedimentológico y petrológico.

Como se indica en la figura 4, la sedimentación evaporítica marina durante el ciclo alpino produjo en la Península Ibérica un empobrecimiento significativo en cloruros (especialmente en los de K-Mg) con respecto a los sulfatos (fraccionamiento sedimentario). Por otro lado, importantes volúmenes de sal triásica fueron extruidos en el período comprendido entre el Jurásico y Eoceno, los cuales fueron eliminados hacia el océano (fraccionamiento estructural). Este mecanismo general de reciclaje de las evaporitas marinas mesozoicas y eocenas en las terciarias continentales (Ortí *et al.*, 1988a) viene facilitado por la sincronía entre el hundimiento de las cuencas y fosas endorreicas durante el Paleógeno-Neógeno y la deformación y levantamiento de las cadenas alpinas circundantes de aquéllas (existen algunos indicios claros de que este mecanismo de reciclaje actuó ya, al menos localmente, en las fases distensivas del Cretácico inferior). También los contenidos en bromo de las halitas continentales, sistemáticamente un orden de magnitud inferior al de las halitas marinas, reflejan el mecanismo de reciclaje.

Consecuencia directa de este proceso parece ser también la paragénesis más característica de los Terciarios continentales peninsulares. En orden de concentración creciente, ésta es la siguiente:



Esta secuencia se presenta, más o menos completa, en diferentes formaciones de las cuencas del Ebro y del Tajo. De un modo más incompleto, se presenta también en otras formaciones de las cuencas del Ebro, Calatayud y Granada, y probablemente esté extendida a otras cuencas menores, en las que faltan datos de sondeos. Posiblemente, las reacciones intrasedimentarias ocurridas entre los sulfatos de Ca y Na y las salmueras intersticiales en los lagos endorreicos produjeron el crecimiento diagenético temprano de los sulfatos glauberita, thenardita y polihalita.

Los sistemas evaporíticos lacustres en el Terciario español están caracterizados, en general, por presentar una alta relación sulfato/cloruro y por ser muy someros. Pueden ser distinguidos dos tipos principales (Ortí *et al.*, 1989b):

- A) Lagos salinos de posición central: son lagos endorreicos finales, muy amplios, con alta salinidad y con potente registro evaporítico (hasta 1.000 m). Exhiben las típicas y complejas paragénesis antes referidas, con cloruros y sulfatos de Na y Mg. Sólo muy excepcionalmente han preservado algo de yeso primario en las formaciones más jóvenes (Mioceno). Periféricamente a estos grandes sistemas lacustres pueden desarrollarse importantes formaciones nodulares de sabkhas,

con encajantes ya sea de lutitas rojas o de carbonatos lacustres muy someros. Dichas formaciones nodulares presentan interés para la industria de los alabastros y escayolas por su pureza y la magnitud de sus meganódulos.

B) Lagos sulfatados: son mucho menores y con baja salinidad y un registro evaporítico sólo modesto (hasta 100 m). Presentan yeso primario (facies microlenticulares y masivas) en las formaciones más modernas (Mioceno). Este yeso puede llegar a ser muy puro, libre de matriz, y masivo debido a intensa bioturbación. El sílex nodular es un producto diagenético común. Ocasional o frecuentemente se desarrollan meganódulos (> 50 cm de diámetro) de yeso secundario, adquiriendo

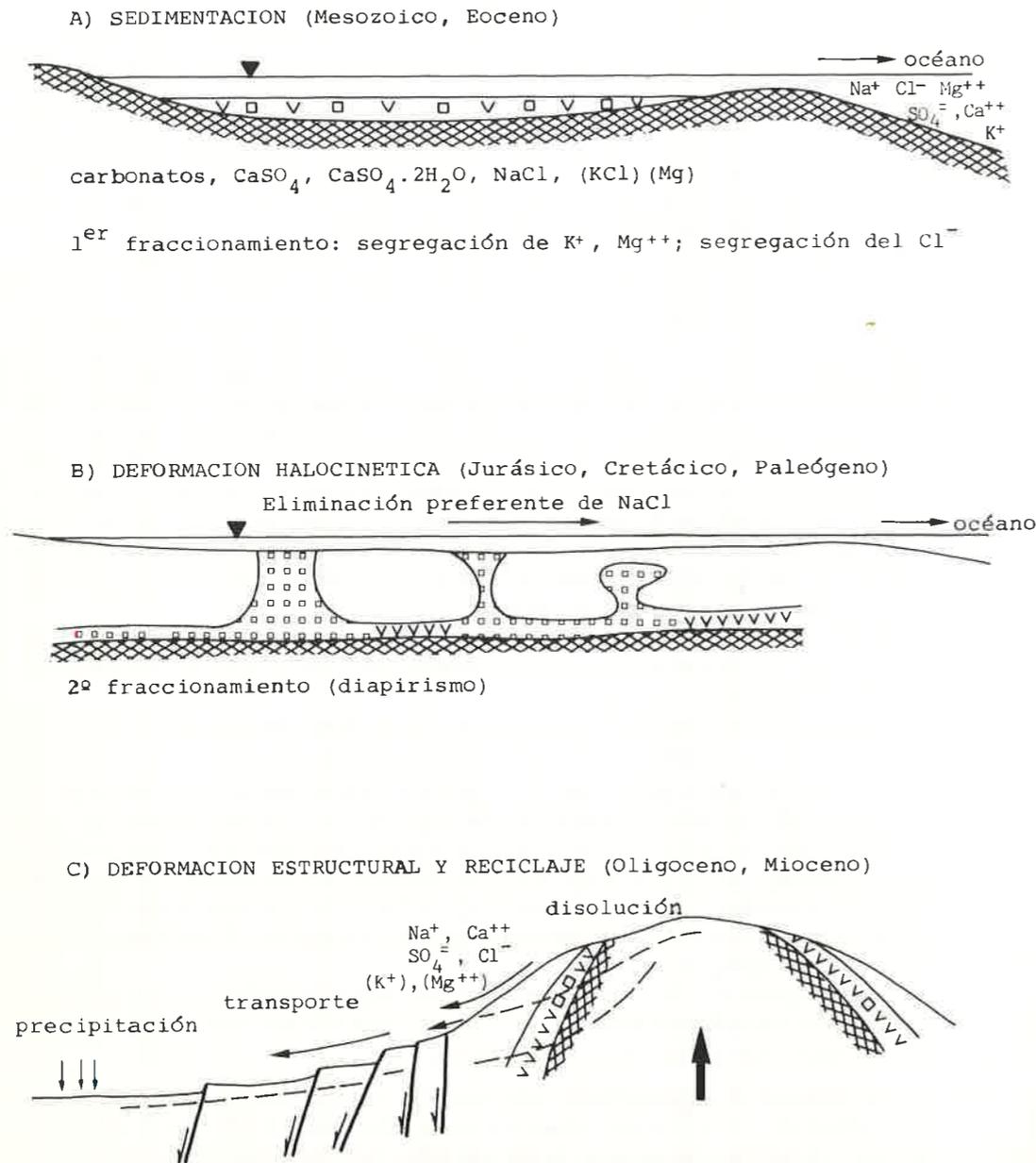


FIG. 4. Fases del proceso de reciclaje de evaporitas marinas en las cuencas continentales del Terciario peninsular, con indicación de los fraccionamientos asociados (según Ortí *et al.*, 1988a, fig. 1).

entonces estas formaciones gran interés para la obtención de alabastros y escayolas. Estos lagos pueden formar cinturones externos en las amplias cuencas evaporíticas (Ebro, Calatayud) o bien ocupar una posición central (Teruel, Tajo oriental). También pueden presentar intercalaciones o grandes áreas de yesos detríticos de importancia variable.

Un corte general idealizado de estos sistemas de lagos, con sus productos evaporíticos y las principales asociaciones de facies, se representa en la figura 5. En ella se supone que los dos sistemas lacustres evaporíticos se suceden con solución de continuidad desde el borde a centro de sistema, como de hecho se observa en algunos casos en determinadas cuencas. Sin embargo, ambos sistemas pueden ser independientes.

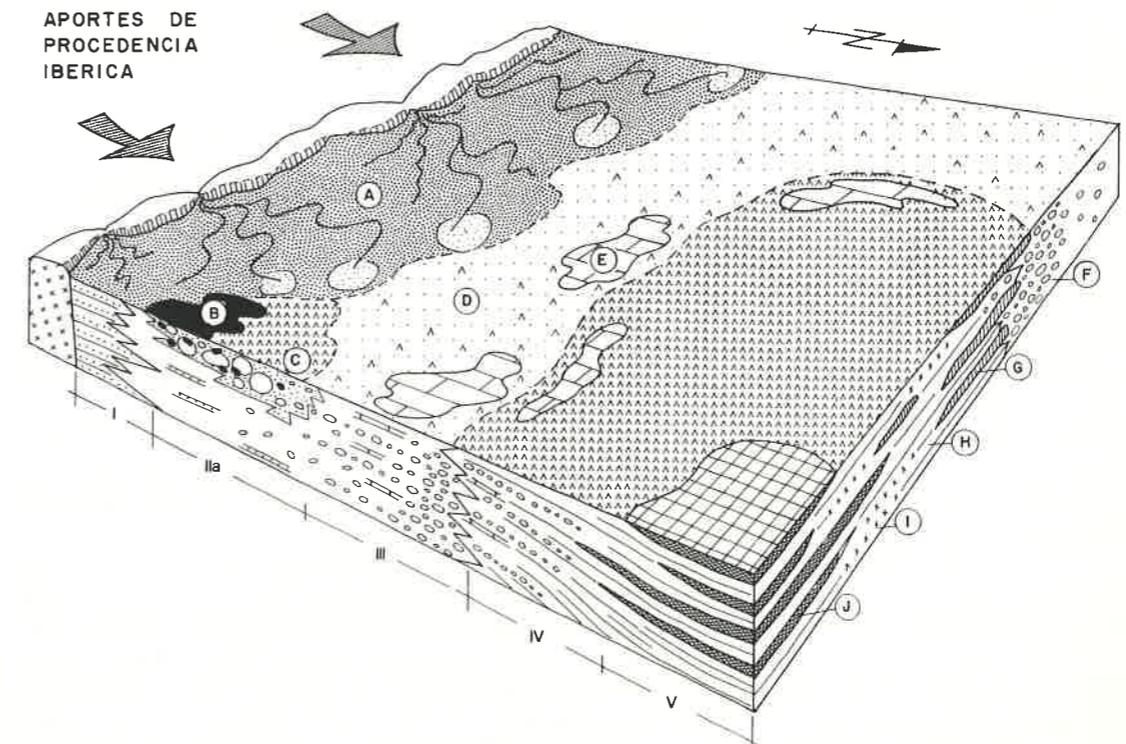


FIG. 5. Bloque-diagrama general idealizado de los subambientes lacustres entre el borde y centro de una cuenca evaporítica de los Terciarios continentales peninsulares (ejemplo tomado del Mioceno inferior de la Cuenca del Ebro). Todos los cinturones de facies no siempre se dan, y en particular, los lagos sulfatados marginales pueden estar desconectados de los lagos salinos centrales (según Salvany, 1989).

- I: zona de abanicos aluviales de margen de cuenca.
- II: llanura lutítica aluvial.
- III, IV y V, respectivamente: zonas marginal, intermedia e interna del medio evaporítico.
- A: conglomerados y areniscas.
- B y C: yesos marginales, con facies micro y meganodulares de yeso.
- D: lutitas con areniscas.
- E: carbonatos.
- F: anhidrita nodular.
- G: glauberita.
- H: yeso laminado.
- I: polihalita.
- J: halita.

RECURSOS EN EVAPORITAS DE LAS FORMACIONES DE ORIGEN MARINO (SULFATOS CALCICOS Y SAL)

Como se ha dicho, el territorio español ha experimentado sedimentación evaporítica de origen marino en muchos de los sistemas que componen el ciclo alpino: Triásico, Jurásico, Cretácico, Eoceno y Mioceno. La sedimentación evaporítica ha ocurrido tanto en cubetas someras como en cuencas residuales de mayor profundidad. Los episodios evaporíticos referidos suelen producirse en momentos de regresión marina, aunque también se presentan algunos ligados a transgresiones y situaciones de franca expansión de facies.

Formaciones del Triásico

Sin duda son las principales por su enorme extensión geográfica y potencia sedimentaria. Se distribuyen por las principales cordilleras y zonas tabulares, estando también presentes en los sustratos de algunas cuencas terciarias continentales. La figura 6 resume sus materiales y unidades litoestratigráficas principales.

Sulfato cálcico. Los episodios de sulfato cálcico correspondientes al Buntsandstein se presentan en los Catalánides, así como en el subsuelo de la cuenca del Ebro. Los correspondientes al Muschelkalk medio afloran preferentemente en los Catalánides, principalmente al S del río Francolí, donde sus facies laminadas pueden superar localmente los 50 m de potencia, habiendo sido explotadas en numerosas canteras. También son conocidos en profundidad en la cuenca del Ebro y en el Maestrazgo.

Los depósitos de sulfato cálcico correspondientes al Keuper son los principales del Triásico, y han sido intensamente explotados tanto en canteras (en todo el territorio español) como en minas (País Vasco, principalmente). Dentro del Keuper se presentan dos series yesíferas, o evaporíticas en general: a) la inferior, de tonos grises, y b) la superior, de tonos rojos y nuevamente grises al techo. Ambas series están distribuidas ampliamente por Levante, Cordillera Ibérica, País Vasco, Catalánides y en los dominios prebético y subbético de las Cordilleras Béticas, con sólo pequeñas variaciones locales. La serie superior está bien desarrollada en el Pirineo.

Las características de ambas series fueron descritas inicialmente por Ortí (1974) en Levante, y posteriormente por Salvany y Ortí (1987) en Catalánides y por Gil *et al.* (1987) para el Prebético de Jaén. La serie yesífera inferior (K1), a pesar de su gran potencia en muchas zonas (> 150 m), resulta de menor interés para las explotaciones debido a su carácter de alternancia entre capas de yeso laminado y capas de arcillas. Por el contrario, el tramo yesífero gris (K5: Fm Yesos de Ayora) del techo de la serie superior es muy puro (facies laminadas predominantes, y nodulares subordinadas), alcanzando en muchos dominios potencias comprendidas entre 30 y 50 m. Así, se le reconoce desde Poza de la Sal (Burgos) y Pirineo de Lérida, hasta Jaén, pasando por Molina de Aragón, Valencia, Alicante y Murcia, aunque falta como tramo explotable en Catalánides (en el sector de Molina de Aragón-Albarracín, Pérez Arlucea, 1985, ha reconocido las diversas unidades de las dos series evaporíticas). La unidad K4, aunque muy potente y de gran reparto geográfico debido a su carácter expansivo, no resulta explotable por su alto contenido en arcillas rojas y grises. En ocasiones la anhidrita triásica llega a aflorar en las canteras y minas, perjudicando ello las extracciones.

Sal. El artículo de Castillo (1974) constituyó una aportación fundamental para el conocimiento de la sal triásica. Los depósitos de sal del Buntsandstein, aunque poco importantes, son conocidos en el sustrato triásico de la cuenca del Ebro (Jurado, 1989). Igualmente lo son los del Muschelkalk medio (fig. 6). Estos últimos desarrollan potencias muy importantes en la zona del Maestrazgo, principalmente en el núcleo de anticlinales (sondeos de Bobalar), donde se acumulan diapíricamente series halíticas de más de mil metros, sin llegar nunca a aflorar.

Los principales depósitos salinos son los del Keuper, tanto en la serie inferior (K1) como en la superior (K4). Esta sal da lugar a numerosísimas manifestaciones salinas del tipo manantial, que se explotan o se han explotado en pequeñas instalaciones del tipo salina de evaporación. La sal llega a aflorar excepcionalmente en algunos puntos, como Minglanilla (Cuenca) y el domo de La Rosa (Jumilla, Murcia), donde es extraída en la actualidad a cielo

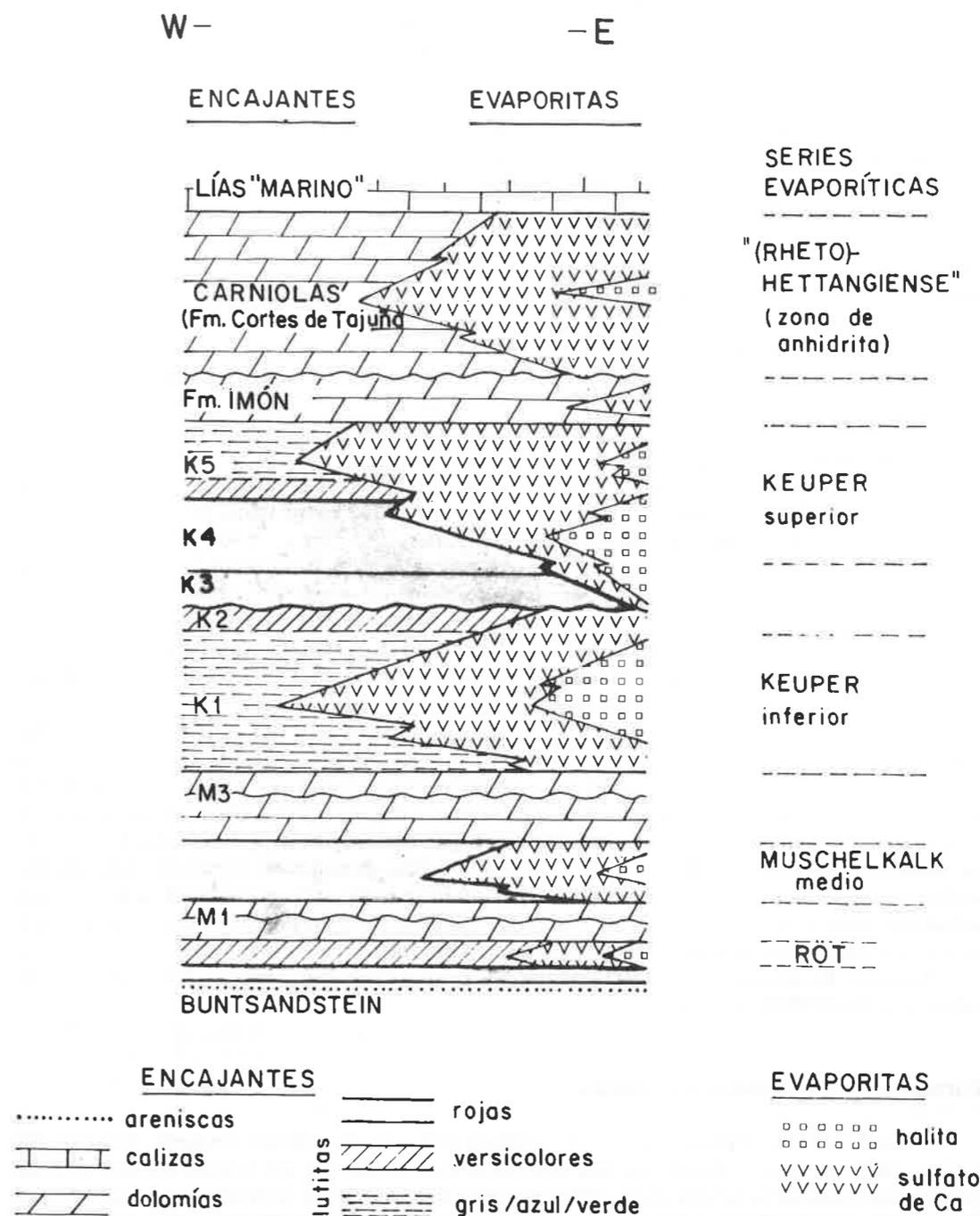


Fig. 6. Principales episodios evaporíticos triásicos (series) de la Península Ibérica. Se distinguen los productos propiamente evaporíticos respecto de los sedimentos encajantes (modificado de Ortí, F., 1987a, fig. 2).

abierto por Jumasal. Explotaciones mineras antiguas de sal triásica, hoy abandonadas, se reconocen en Cabezón de la Sal (Santander) y Minglanilla. Las minas del domo de Pinoso (Alicante) fueron cerradas hacia 1973 para pasar a la explotación por disolución (Rocamora y Ràfols, 1978), por parte de Unión Salinera de España, S. A. Se estima que las reservas de este domo superan las 350.10⁶ tons. Algunas explotaciones de sal, ya sea en mina o cantera, recurren a la purificación de la misma mediante el sistema de salinas de evaporación. Las explotaciones por disolución más antiguas son las de Solvay y Cía., S. A., en Mina Polanco, cerca de Torrelavega (Santander), estando la producción actual próxima a 13.10⁶ tons, y con reservas seguras de 140.10⁶ tons.

Así, la sal del Keuper se presenta tanto en depósitos estratiformes como en zonas diapíricas. Entre los primeros, son bien conocidos por sondeo y prospección sísmica los depósitos del surco profundo de Carcelén-Ledaña-Gabaldón (Albacete-Cuenca), ya puesto de manifiesto por Castillo (1974), donde la sal del Keuper alcanza potencias de 400 m. También es conocida en la actualidad la sal del Keuper en el sustrato de la cuenca de Almazán (Enresa, 1987), así como al NE de Guadalajara (sondeo Santa Bárbara, de Shell España, N.V.). Igualmente en disposición estratiforme es conocida en el sustrato de la cuenca del Ebro (Jurado, 1989) y en parte del Maestrazgo. La riqueza en NaCl de todas estas formaciones puede ser muy alta, aunque las profundidades excesivas (más de 1.000 a 1.500 m, en general) pueden dificultar su extracción por disolución.

Las zonas diapíricas con sal triásica son muy numerosas en el suelo peninsular español. La mejor desarrollada es la vasco-cantábrica, de la que existe una amplia bibliografía (Ríos, 1963; Brinkmann y Lögters, 1968; Serrano *et al.*, 1989; etc.), y en la que los recursos de sus diapiros y estructuras diapíricas son prácticamente inagotables. También de gran interés resulta la zona prebética del límite Alicante-Murcia (domos de Pinoso, La Rosa, Jumilla, Yecla, etc.), con morfologías de diapiros muy recientes, así como la del Prepirineo central (área al N de Balaguer-Barbastro). El papel tectónico jugado por las formaciones evaporíticas triásicas fue ampliamente considerado por Ríos (1963), aunque debido a la enorme importancia del mismo los estudios que se realicen en este sentido nunca serán suficientes. Recientemente las diversas publicaciones de los geólogos de Hispanoil sobre la zona prebética oriental han refinado la estratigrafía evaporítica de la serie del Keuper (Suárez *et al.*, 1985) y han sugerido una gran importancia para el papel jugado por el diapirismo de los materiales triásicos en la estructuración de este sector (Martínez del Olmo *et al.*, 1986).

En general, esta sal triásica es perfectamente bandeada, aunque la recristalización por causas diapíricas o tectónicas es importante. Por ello, el tamaño cristalino es con frecuencia grueso y en buena parte esta sal ha perdido sus inclusiones fluidas originales. Sus contenidos en bromo (y en potasio) indican siempre que es de origen marino, al igual que la composición isotópica de los sulfatos cálcicos (yeso y anhidrita) que la acompañan, tanto del Muschelkalk como del Keuper. La polihalita está ocasionalmente presente como sulfato accesorio en la halita. No hay indicios claros de la presencia de potasas en la sal triásica española, aunque se conoce su existencia en la vertiente nord-pirenaica (Dax, Francia), por lo que no puede descartarse totalmente esta posibilidad.

Intentos de síntesis sobre las formaciones evaporíticas del Triásico han sido presentados por Ortí (1982-83, 1987a).

Formaciones del Jurásico y Cretácico

Sulfato cálcico. Prácticamente en continuidad con la unidad yesífera superior del Keuper (K5), se desarrolla en muchos dominios una formación del sulfato cálcico nodular que en los sondeos se revela muy potente (del orden de varios cientos de metros). A esta formación, que puede presentar algunas intercalaciones dolomíticas, se la conoce por «zona de anhidrita» del Rheto-Hettangiense, o bien del Lías inferior o del Infralías. Suele corresponderse con la unidad de brechas de colapso (carniolas del Infralías) en los afloramientos. En sondeo esta formación anhidrítica está bien conocida en Cuenca-Albacete-Valencia y en

el Valle del Ebro, aunque también se identifica en otras muchas zonas, pudiendo alcanzar enormes potencias.

Cuando llega a florar, el yeso secundario a que da lugar puede distinguirse fácilmente del nivel K5 del Keuper si se intercala entre ambas la unidad dolomítica conocida por Fm. Imón (fig. 6). En los sondeos, la distinción por diagrafiás entre ambas unidades de sulfato cálcico no ofrece dudas (Suárez *et al.*, 1985). La terminología antigua refiere estos sulfatos como «Yesos del Rético» (aunque algunas de las unidades así citadas pueden corresponder, en realidad, al K5), que han sido intensamente explotados por su pureza en diversas zonas. Esta formación anhidrítica ofrece las mayores acumulaciones estratiformes conocidas en la Península Ibérica, próximas a los 800 m en el surco de Ledaña-Carcelén (Albacete). Los datos isotópicos de que se dispone en muestras de sondeos profundos (Utrilla *et al.*, 1987) indican una afinidad triásica de gran parte de esta formación en el surco de Albacete, y de su totalidad en el sustato de la cuenca del Ebro. En los afloramientos de la zona pirenaica central esta unidad alcanza también potencias de varios cientos de metros, aunque nuestras facies sean predominantemente laminadas.

En la Cordillera Ibérica los sondeos cortan otros horizontes anhidríticos en el Jurásico medio y superior, encajados entre formaciones también dolomíticas, aunque en afloramiento sólo llegan a manifestarse como carniolas (Morillo y Meléndez, 1979).

El Cretácico inferior es referido por Ríos (1963) como importante por su contenido en evaporitas. Por nosotros son únicamente conocidas algunas citas de pequeñas cantidades de yeso en la cuenca wealdica de Cameros (Soria).

Las formaciones yesíferas son mucho más frecuentes en el Cretácico superior, llegando a aflorar en diversos puntos de la Cordillera Ibérica. En sondeo son conocidas como anhidritas nodulares (Meléndez, 1975), existiendo dos unidades (la «inferior», del Coniaciense, y la «superior», del Campaniense). Las potencias de estas unidades anhidríticas en el sustrato de la Depresión Intermedia pueden estimarse próximas a 300 m (Meléndez *et al.*, 1985). En la Serranía de Cuenca se manifiestan sólo como unidades de brechas dolomíticas, aunque afloran como yesos a lo largo de su borde occidental, donde han sido explotados (zona de Noheda-Chillarón).

Estos sulfatos del Cretácico superior afloran también en la Sierra de Altomira, en particular en su lado occidental, donde han sido explotados (Anguix, Bolarque, Albalate de Zorita) (Sánchez, 1979). Se trata, en sus zonas más potentes, de yesos de litofacies nodulares con intercalaciones de dolomías.

Esta formación evaporítica marina se prolonga extensivamente por todo el sustrato de la cuenca del Tajo (formación Santa Bárbara, de los petroleros), superando los 300 m y 70 m en los sondeos de Santa Bárbara y Pradillo (Shell España, N.V.), respectivamente. Incluso en Segovia (Sierra de Pradales) existen pequeñas explotaciones mineras de yesos del Cretácico superior en diversas localidades (Valle de Tabladillo, Linares) e igualmente en Huerta del Rey (prov. Burgos). Finalmente, también en el Maestrazgo (zona de Villarluengo) son conocidos los yesos nodulares al techo de los sedimentos marinos de finales del Cretácico, aunque no han llegado a explotarse.

Algunas de estas formaciones de Cordillera Ibérica-Maestrazgo-Prepirineo han sido asimiladas a las «facies Garumn», teniendo una edad imprecisa entre el Cretácico superior y el Eoceno. Igualmente su origen, ya sea marino o continental, puede variar según los dominios (Utrilla, 1989).

En Cantabria y Burgos existen indicios de evaporitas del Cretácico superior, preservadas como nódulos de sílex, que han reemplazado a antiguos nódulos de anhidrita (Elorza y Rodríguez, 1984).

Sal. Únicamente es conocida la sal en la base de la formación anhidrítica del Infralías, en el sector de la Cordillera Ibérica correspondiente a los sondeos petroleros del surco de Gabaldón-Belmontejo (Cuenca), con potencias máximas de 150 m (Enresa, 1987). En cantidades discretas, podría encontrarse también en otras zonas, aunque no parece que pueda llegar a tener un interés económico especial. Vázquez (1983) refiere la existencia de

materiales salinos esporádicos en el Albiense (facies Utrillas), aunque nosotros desconocemos su importancia y localización.

Formaciones del Eoceno

Están restringidas al dominio surpirenaico, donde se localizan dos fases evaporíticas principales: una correspondiente al Eoceno medio (Luteciense) y otra correspondiente al Eoceno superior (Priaboniense). La primera se trata de una potente unidad de yesos y anhidritas que se desarrolla sólo en Cataluña, desde el manto del Pedraforca hasta el Mediterráneo, aflorando en ambos flancos de la unidad alóctona conocida por Sinclinorio de Ripoll. La segunda se corresponde con la cuenca potásica surpirenaica, y se caracteriza por una importante sedimentación de cloruros.

Sulfato cálcico. La unidad luteciense de sulfato cálcico antes referida (Fm. Yesos de Beuda) alcanza los 80 m en afloramiento, aunque su potencia en profundidad puede ser muy superior. Presenta litofacies laminadas y bandedas de yesos secundarios muy puros, que son intensamente explotados desde La Pobla de Lillet, por el W, hasta Beuda, por el E (gracias a lo cual la provincia de Gerona alcanzó el 6.º lugar de la producción estatal en 1986; ver apartado de «aspectos geoeconómicos de los sulfatos cálcicos»). Esta formación se ha generado como un depósito de sulfato cálcico de centro de surco marino relativamente profundo (Ortí *et al.*, 1987-88).

Los sulfatos del Priaboniense (Mb. Yesos de Odena, dentro de la Fm. Salina de Cardona) consisten, por el contrario, en un anillo periférico a la cuenca potásica, con potencias de 30 a 40 m. Se trata de yesos secundarios pseudomórficos de yesos seleníticos primarios, así como de yesos estromatolíticos que intercalan laminaciones carbonatadas, también de origen algal. Estas características, más propias de borde de cuenca (Busquets *et al.*, 1985), le restan ligeramente pureza frente a los yesos lutecienses. Aún así, son intensamente explotados en numerosas localidades a lo largo del cinturón: Igualada, Odena, Artés, Colluspina, Vic, etc. Las masas de anhidrita en estos yesos priabonienses son frecuentes, aún más que en los lutecienses, perjudicando ello las explotaciones.

Sal. Los cloruros ocupan el centro de las cubetas evaporíticas priabonienses de Cataluña y Navarra, alcanzando potencias entre 300 y 100 m, respectivamente. La sal gema fue explotada antiguamente en la montaña de sal de Cardona (Barcelona). Ríos (1963) ofrece amplia documentación sobre la estructura de estos yacimientos, por lo que aquí únicamente nos centraremos en algunos aspectos de las potasas ver apartado de «las potasas surpirenaicas».

Formaciones del Mioceno

Corresponden a las cuencas neógenas de la fachada mediterránea de la Península Ibérica.

Sulfato cálcico. Una de las más antiguas de estas fosas, la del Penedés (Barcelona), incluye en sus depósitos del Mioceno inferior un horizonte yesífero de unos 60 m de potencia, que es intensamente explotado en Vilobí. Se trata de facies laminadas y nodulares de cierta pureza, principalmente de yeso secundario (Ortí y Pueyo, 1976), aunque de extensión muy limitada. El resto de formaciones yesíferas pertenecen principalmente al Tortoniense y Messiniense de diferentes cuencas de las Cordilleras Béticas. Los yesos seleníticos que los integran, muy puros y de grandes tamaños (edificios cristalinos de varios metros de altura), son intensamente explotados en las cuencas de Sorbas (véase en ello el liderazgo de la extracción de yeso de la provincia de Almería durante 1986, como se indica en el apartado de «aspectos geoeconómicos de los sulfatos cálcicos») y de Murcia-Alicante (Benejúzar y San Miguel de Salinas; Ortí y Shearman, 1977). Estos yesos seleníticos son también conocidos por sondeos en la cuenca de Palma de Mallorca, con potencias de hasta 100 m.

pero nunca llegan a aflorar. Aunque apenas son objeto de explotación, también existen facies seleníticas en las cuencas de Carboneras, Mula, Granada y Fortuna. Las facies laminadas y nodulares de yesos secundarios messinienses son explotados en Lorca, donde son conocidas mineralizaciones de azufre, así como horizontes ricos en pizarras bituminosas pre-evaporíticas (IGME, 1982).

Sal. El cloruro sódico acompaña a los yesos en algunas de las cubetas anteriores, en particular en Granada, Fortuna y Lorca. Evidencias directas de sal mediante sondeos se tienen en Granada y en Lorca, conociéndose las manifestaciones del tipo salina en Fortuna y también en Granada (La Malá, Cubillas). La sal de Lorca, con potencias de varios cientos de metros, tiene contenidos en bromo típicamente marinos (Ortí *et al.*, 1988b), tratándose de una sal bandeda, pero afectada por importantes procesos de recristalización intrasedimentaria.

LAS SALINAS MARITIMAS

Las salinas marítimas de evaporación constituyen un importante productor de sal en nuestro país. Frente a la sal de las formaciones geológicas antiguas, del Mesozoico o del Terciario, la evaporada anualmente en las salinas litorales tiene el interés de conservar ciertas cantidades de sales de Ca y Mg, así como muy pequeñas cantidades de varios elementos, como el I, Fe, F, etc. Este hecho la hace más adecuada para ciertos usos (consumo humano, industria conservera, salazones, etc.) que la sal fósil, que en buena parte ha perdido las referidas sustancias.

En las costas españolas existe una sola zona con salinas naturales, en el sentido de lagos salados: las Salinas de Torreveja (1.400 Ha) y de La Mata (600 Ha) en Alicante, con una producción anual superior al millón de tons. En la actualidad una parte importante de la sal precipitada en la Salina de Torreveja (y explotada por la Nueva Compañía Arrendataria de Salinas de Torreveja) procede del vertido en ella de las salmueras saturadas en NaCl provenientes de la disolución de la sal triásica del domo de Pinoso, situado éste a más de 50 kms de la referida salina.

Adicionalmente, numerosas salinas artificiales emplazadas tanto en la costa mediterránea peninsular como balear, así como en la costa atlántica peninsular y canaria, tienen producciones anuales significativas, siendo las mayores de ellas del orden de las 100.000 tons. Algunas de estas salinas son las del delta del Ebro en Tarragona (La Trinidad, 447 Ha), las de Santa Pola (Bras del Port, con 950 Ha, y Bonmatí, con 207 Ha), las del Mar Menor (El Cotorrillo, en San Pedro del Pinatar, Murcia, con 610 Ha, y las del Cabo de Palos), las de Almería (Cabo de Gata y las de Roquetas-Cerrillos) y las de Cádiz (Puerto Real, Chiclana, San Fernando y Puerto de Santa María). En la España insular cabe citar las de Ibiza y Formentera, y las de Canarias (Las Palmas, Lanzarote y Santa Cruz de Tenerife).

Como ejemplo de producción puede referirse la de 1981, que fue de 1.393.000 tons para el conjunto de todas las anteriores salinas, tanto naturales como artificiales. Descontando la producción de Torreveja, próxima al millón de tons. como ya se ha dicho, del resto de sal obtenida en las salinas artificiales los porcentajes fueron los siguientes: salinas mediterráneas peninsulares, 87%; balears, 4,8%; atlánticas peninsulares, 7,6%; canarias, 0,6% (Ràfols, 1984).

Dependiendo de la climatología anual, el grosor de capa halítica que suele registrarse en los cristalizadores de las salinas marítimas artificiales oscila entre 10 y 17 cm. La sal es del tipo tolva (hopper) y piramidal (chevron), con alta porosidad. Las salmueras residuales, a concentración próxima a 370 g/l, se devuelven al océano. Entre los años cincuenta y los setenta, a lo largo de casi veinticinco años, Unión Salinera de España procesó estas salmueras en las plantas de Torreveja y del Cabo de Gata para obtener bromo, así como diversas sales y lejías (Rocamora y Ràfols, 1966).

El yeso depositado en amplios concentradores, a lo largo de este proceso de evaporación del agua marina, no es utilizado industrialmente, excepto para reforzar el firme de

los viales de las propias instalaciones salineras. Detalles del funcionamiento y de otros diversos aspectos (sedimentológicos, hidrológicos, biológicos, etc.) de algunas de estas salinas han sido ofrecidos en el volumen editado por Orti y Busson (1984). A efectos comparativos puede consultarse la monografía dedicada a Salin-de-Giraud, situada en La Camarga, en la desembocadura del Ródano (Géol. Méditer., t. IX, n. 4, 1982), que es la salina artificial mayor de Europa, con una producción anual próxima al millón de tons, y con una superficie de evaporación útil de 10.500 Ha, de las cuales 770 están exclusivamente dedicadas a cristalizadores.

LAS POTASAS SURPIRENAICAS

La formación evaporítica surpirenaica del Eoceno superior contiene el único yacimiento de sales potásicas que se conoce en España. Dicha formación, de origen marino, se extiende desde Navarra a Cataluña aunque sólo presenta sales potásicas en sus dos extremos oriental (cuenca potásica catalana) y occidental (cuenca potásica navarra).

La distribución geográfica de la formación potásica es conocida a partir de datos de sondeos, de prospección geofísica y de mina. En la figura 7, donde se muestra dicha distribución, puede observarse además que mientras la cuenca potásica catalana se sitúa en la zona autóctona de antepaís surpirenaico, la cuenca potásica navarra se localiza en la zona alóctona. La continuidad de la formación evaporítica entre ambas cubetas potásicas no ha podido ser demostrada debido a la falta de sondeos en la zona intermedia. Sin embargo, las similitudes petrológicas y geoquímicas entre ambas (Pueyo, 1975; Rosell, 1983) y la posibilidad geométrica de continuidad en subsuperficie, si se tienen en cuenta las modificaciones originadas por el emplazamiento de los mantos pirenaicos (Puigdefábregas, 1975), parecen apoyar dicha idea.

En la cuenca potásica navarra, la estructura tectónica ha dado lugar a la individualización de varias zonas potásicas que suelen coincidir con zonas sinclinales (Ríos, 1963): cubeta potásica de Pamplona; zona de Puente la Reina; zona del sinclinal de Izaga-Monreal; zona de Javier-Los Pintano (Rosell, 1983). Hasta ahora, sólo ha sido explotada la primera de ellas pero recientemente se ha vuelto a emprender la exploración en la zona de Javier.

En la cuenca catalana los datos de sondeos indican la existencia de dos subcubetas potásicas: una principal que comprendería toda la zona de Cardona, Súria, Sallent y Balsareny, y otra de dimensiones más reducidas situada en el área de Vilanova de l'Aguda. Los materiales salinos han originado una serie de fenómenos diapíricos que se traducen en superficie en dos sistemas de pliegues de dirección aproximada SE-NW y ENE-WSW. Sin embargo, la base de la formación salina presenta una topografía muy suave que además no guarda paralelismo con la que se presenta en superficie (Riba, 1975; Riba *et al.*, 1975; Pueyo, 1975).

En el límite oriental de la cuenca catalana se encuentran preservadas las facies marginales de borde de cuenca, constituyendo cinturones en disposición concéntrica: el cinturón externo arrecifal (Fm Tossa y sus equivalentes) y el cinturón interno sulfatado (Yesos de Odena y sus equivalentes) que rodean un cuerpo central de facies cloruradas, el cual incluye discontinuamente los niveles potásicos. La precipitación de los minerales potásicos debió tener lugar en las zonas más deprimidas de la cuenca, donde se acumularon las salmueras más concentradas y densas.

La sucesión salina que se presenta en ambas cubetas potásicas, oriental y occidental, es muy similar (fig. 8) y representa un macrociclo evaporítico empobrecido en sulfato magnésico (Braitsch, 1971). La única variación notable entre las dos cubetas se encuentra en la potencia, tanto de cada unidad salina en particular como del conjunto de la formación evaporítica, que siempre es superior en la cuenca catalana.

La base de la formación salina la constituyen margas azules marinas. Se trata, en la cuenca catalana, de las facies más distales de fan-deltas desarrollados en el borde SE de la

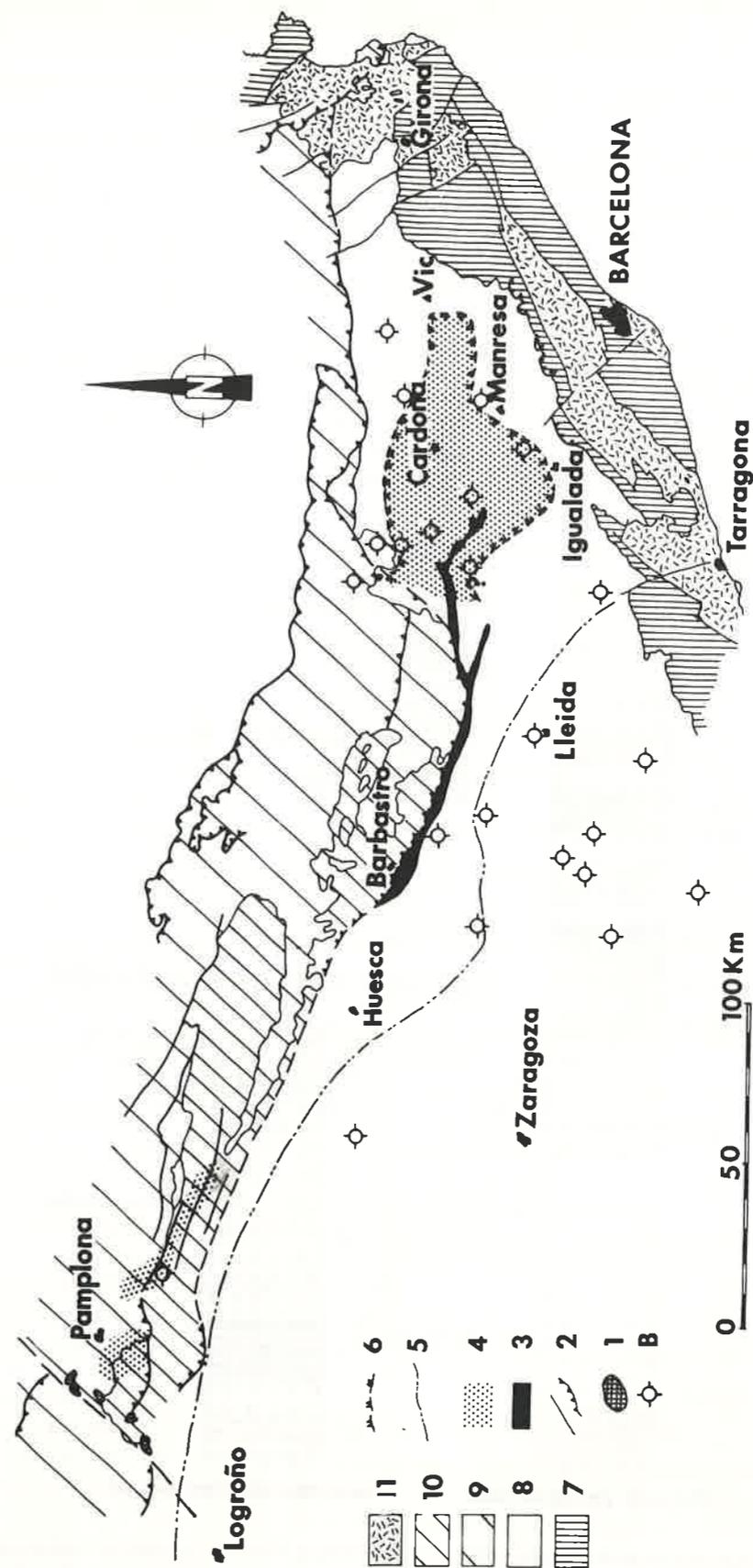


FIG. 7. Mapa geológico del sector septentrional de la cuenca del Ebro con situación de las formaciones potásicas de Talañola y Navarra, así como la zona principal de apilamiento de los yesos de la Fm. Barbastro. 1) diapirios triásicos. 2) falla, cabalgamiento, 3) yesos de Barbastro, 4) límite del Eoceno marino, 6) límite conocido de la cuenca potásica catalana, 7) pre-Terciario, 8) Terciario autóctono en el cuenca del Ebro, 9) pre-Oligoceno (alóctono), 10) Oligoceno (alóctono), 11) Neógeno y Cuaternario. (Rosell y Anadón, en Rosell 1983, modificado.)

cuenca (Montserrat, San Llorenç de Munt). En la cuenca navarra, las margas basales corresponden a sedimentos marinos profundos (en base a su contenido faunístico), localmente turbidíticos, que hacia el techo presentan indicios de somerización. Los niveles más próximos a la sucesión salina muestran, en este sector, características típicas de sedimentación anóxica: laminación fina bien preservada, ausencia de restos orgánicos excepto fragmentos vegetales carbonizados.

La unidad evaporítica inferior está constituida por una capa anhidrítica. En Cataluña presenta una potencia de 4 a 5 m y litofacies laminadas, según datos de sondeo. En Navarra, donde esta capa es cortada en mina, tiene una potencia de 0,6 a 1 m y muestra predominantemente litofacies laminadas, aunque también se presentan estructuras nodulares. Las primeras, constituidas por una alternancia de anhidrita y carbonato, muestran un aspecto irregular y ondulado que sugiere un origen estromatolítico.

Por encima de la anhidrita se presenta una unidad halítica que tradicionalmente se ha denominado sal de muro. En Cataluña presenta una potencia de 130 a 200 m, mientras que en Navarra sólo alcanza unos 10 m. La sal de muro presenta litofacies bandeada. Alternan

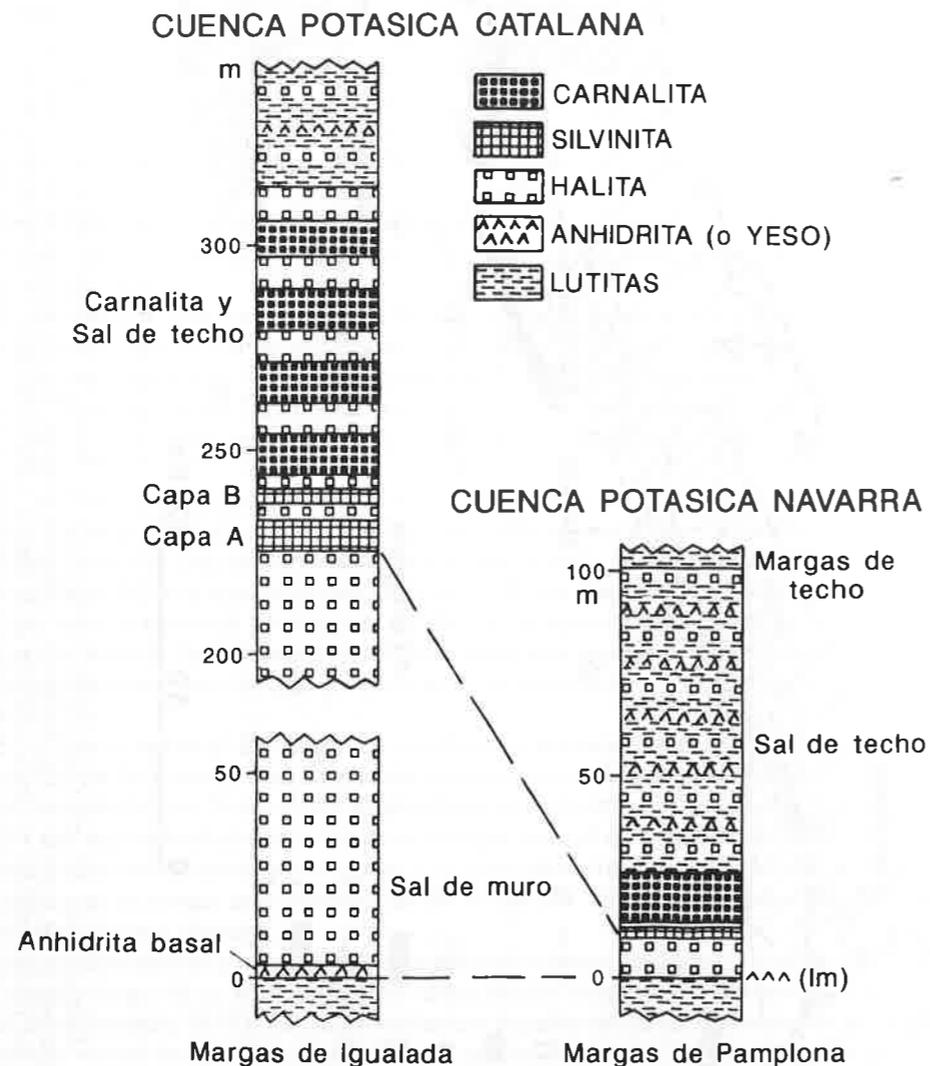


FIG. 8. Series estratigráficas de la formación potásica en Cataluña y Navarra, mostrando sus unidades y correlación (Rosell, 1983, modificada.)

bandas oscuras y claras (transparentes, rosadas o blancas), de orden centimétrico. Las bandas oscuras están formadas por grandes cristales con inclusiones («hopper crystals», tolvas), asociados a fragmentos arcillosos. Las bandas claras están constituidas por cristales con inclusiones (de menor tamaño que los anteriores) y cristales transparentes.

Por encima de la sal de muro, se encuentra la unidad potásica inferior, constituida por silvinita (roca de silvita-halita). Esta unidad tiene una potencia de 5 a 20 m en la cuenca catalana y de 2 m en la cuenca navarra, y está formada por capas de silvinita que alternan con niveles halíticos. En las capas de silvinita, el ciclo ideal está constituido por la sucesión de los términos siguientes: insolubles (arcilla, carbonato y sulfatos), halita, silvita o silvita-halita, halita, insolubles. Sin embargo, esta sucesión puede presentar muchas variaciones y en algunos casos los ciclos pueden mostrar más de un nivel silvítico. La potencia de cada ciclo individual oscila de 10 a 30 cm en la cuenca catalana y de 4 a 14 en la navarra.

En los yacimientos catalanes, esta primera unidad potásica se presenta subdividida en dos tramos de silvinita (capas A y B) separados por un tramo halítico intermedio. En el yacimiento navarro, esta unidad potásica está constituida por dieciocho ciclos de silvinita separados por ciclos halíticos. Algunos de estos ciclos silvíticos son muy característicos y pueden ser utilizados como niveles guía a lo largo del yacimiento.

La silvinita presenta variaciones de coloración, rosada o rojiza (según la abundancia de inclusiones de hematites, y el tamaño de grano), se observa que el rojo más intenso corresponde a los tamaños de grano menores.

Los ciclos de halita presentan un grosor de 2 a 12 cm y están constituidos por la alternancia de niveles halíticos y niveles de insolubles. Generalmente los primeros tienen una coloración rosada, mientras que la halita presente en los ciclos de silvinita suele ser de color blanco.

Sobre la silvinita se presenta una unidad carnalítica, formada por una alternancia de capas de carnalita y capas de halita. En la cuenca navarra se encuentra, entre las dos unidades potásicas, un tramo halítico intermedio de 1 m de potencia aproximadamente.

En la cuenca catalana, esta unidad potásica superior, que no es generalmente accesible en mina, tiene una potencia de 40 a 80 m. En el yacimiento navarro, la potencia es de unos 12 m y está constituida por ocho capas carnalíticas. La carnalita muestra predominantemente litofacies brechoides; menos frecuentemente pueden presentarse también litofacies bandeadas y desarrollos nodulares.

Los tramos halíticos que se encuentran entre las capas de carnalita muestran una ciclicidad muy marcada, con alternancia de tres tipos de términos: insolubles, halita transparente y halita rica en inclusiones fluidas.

Tanto en la cuenca catalana como en la navarra, algunas de las capas de carnalita (o a veces incluso la totalidad de ellas) han sido localmente reemplazadas por silvinita secundaria, originada por metamorfismo de disolución de la carnalita (Borchert y Muir, 1964; Braitsch, 1971). Esta litofacies, conocida en los yacimientos españoles como «silvinita transformada» es muy rica en K_2O y se caracteriza por un aspecto caótico, con fragmentos arcillosos dispersos y grandes placas cristalinas rojas y transparentes. En algún caso, sin embargo, pueden llegar a reconocerse ciclos de insolubles, halita y silvinita, que reemplazan a los ciclos originales de halita-carnalita.

Por encima de la carnalita se presenta, en la cuenca navarra, una unidad halítica potente (sales de techo), constituida por una alternancia de niveles halíticos (de 1 a 10 cm) y capas de lutitas laminadas (0,5 a 2 cm). Asociadamente a la halita, se intercalan capas delgadas de anhidrita, que se hacen más frecuentes hacia el techo de la unidad. Los niveles halíticos presentan ciclos similares a los descritos en la unidad de carnalita, que se hacen aquí más complejos debido a la presencia de términos con anhidrita y dolomita.

Sobre las sales de techo se encuentra una unidad lutítica (margas de techo) constituida por lutitas laminadas con intercalaciones anhidríticas, localmente de carácter enterolítico. Esta unidad, de unos 50 m de potencia, es a su vez recubierta por materiales detríticos siliciclásticos (Areniscas de Galar o de Liédena).

En la cuenca catalana no se presenta, por encima del tramo potásico, una unidad análoga a las sales de techo de la cuenca navarra. Sin embargo, la última capa halítica de los ciclos de carnalita-halita suele presentar una potencia superior a las demás. Sobre esta última capa halítica se presentan lutitas grises, con intercalaciones de yeso y halita (35 m en promedio). En la zona de Cardona, estas lutitas son recubiertas por los materiales detríticos de la Fm. Súrria, que corresponden a las facies terminales de abanicos progradantes desde el borde pirenaico hacia el centro de cuenca. Más hacia el sur, en la zona de Súrria, se intercala entre las lutitas grises superiores y los materiales de la Fm. Súrria, una unidad de yesos con litofacies laminadas y nodulares (Yesos de Barbastro) (Sáez, 1987).

Ya en los trabajos antiguos, se había sugerido la posible relación entre el episodio evaporítico del Eoceno superior y el levantamiento de la Cordillera Pirenaica. Con el avance en el conocimiento de la evolución estructural de dicha cordillera, esta relación se concretó en la posible influencia del emplazamiento de los mantos pirenaicos, que provocaría la restricción de la cuenca (Pueyo, 1975; Rosell, 1983) y más recientemente Puigdefábregas *et al.* (1986) han precisado que dicha restricción fue el resultado del emplazamiento del manto del Cadí y de sus equivalentes occidentales.

Como factor adicional de confinamiento pueden también haber influido los cambios eustáticos ocurridos a finales del Eoceno (Vail, 1981).

Por otra parte, la aridez necesaria para la precipitación de los minerales potásicos, pudo ser también la consecuencia de los dos hechos anteriores, debido a la formación de relieve y al incremento en las superficies expuestas a condiciones subaéreas.

El régimen evaporítico a que es sometida la cuenca, provoca la concentración progresiva de la masa de agua. La primera consecuencia de esta concentración fue probablemente la estratificación de dicha masa de agua, individualizándose un cuerpo inferior hipersalino que conduciría a la aparición de condiciones anóxicas en el fondo. En este estadio se produce la sedimentación de las margas anóxicas que constituyen el primer registro del episodio evaporítico.

A medida que la evaporación progresa y la concentración aumenta, van precipitando los minerales evaporíticos en orden inverso a su solubilidad: sulfato cálcico, en primer lugar, halita y sales potásicas. Posteriormente al episodio potásico, tiene lugar una dilución de la salmuera residual, precipitando de nuevo halita y sulfato cálcico.

El estadio sulfatado está representado en el borde de cuenca por el cinturón sulfatado y en el centro de cuenca por la capa anhidrítica basal, de potencia mucho más reducida. El escaso desarrollo de esta capa se debe probablemente a procesos de sulfato reducción bacterial llevados a cabo en las aguas anóxicas del fondo.

Posteriormente a la deposición del sulfato cálcico tiene lugar la precipitación de la halita que, aparentemente, se produce sin interrupciones ya que no se han encontrado superficies de erosión. La alternancia de niveles de halita transparente y halita rica en inclusiones podría tener un origen estacional, formándose estos últimos por precipitación rápida en la interfase aire-salmuera, y los primeros por precipitación más lenta en el fondo debido a sobresaturación durante la estación fría (Dellwig, 1955; Pueyo, 1975; Rosell y Ortí, 1981-82).

El estadio potásico de precipitación está representado por los minerales silvita y carnalita y, al igual que ocurre en muchas otras formaciones potásicas, faltan los sulfatos magnésicos. La ausencia frecuente de estos últimos minerales en las formaciones potásicas naturales de origen marino es una de las discrepancias más notables que presentan éstas respecto a la secuencia teórica de precipitación a partir de evaporación de agua marina, obtenida a partir de estudios experimentales iniciados ya a mediados del siglo pasado. Para explicar este hecho se han propuesto algunas posibles causas cuyo denominador común es la idea de que estos depósitos no pueden formarse a partir de la evaporación de agua marina normal, sino que tiene que haberse producido algún tipo de alteración en el quimismo del cuerpo de agua marina inicial que haya provocado el empobrecimiento de ésta en sulfato magnésico.

Otro aspecto de interés es el origen de la silvita. Aunque se trata del mineral potásico más frecuente en formaciones evaporíticas antiguas de origen marino, algunos autores descartan la posibilidad de un origen primario dado que la precipitación de este mineral requiere condiciones muy específicas.

En la cuenca potásica surpirenaica, la unidad de silvinita presenta una serie de características que sugieren un origen primario (Pueyo, 1975; Rosell y Ortí, 1981-82). Por una parte, la continuidad lateral de los ciclos de silvinita (por lo menos 10 km en la cuenca navarra) conservando la disposición de sus diferentes términos. Este hecho y la falta de superficies de erosión debidas a exposición subaérea, sugieren un origen primario en una masa estable de salmuera. Un segundo argumento lo constituyen las acusadas diferencias texturales y geoquímicas entre esta unidad silvinitica y la silvinita transformada. Las características de esta última están de acuerdo con un origen diagenético por transformación de carnalita.

Aunque no es posible determinar con exactitud la profundidad de la masa de agua de la cuenca evaporítica, sí que merece la pena destacar algunos hechos. Por una parte, que dicha profundidad disminuye a lo largo del episodio evaporítico (relleno evaporítico), desde las margas basales a las unidades detríticas de techo que muestran evidencias de sedimentación muy somera. Y, por otra parte, no parecen haber tenido lugar períodos de desecación, ya que no se conocen superficies erosivas en ninguna de las unidades evaporíticas de las partes centrales de la cuenca.

RECURSOS EN EVAPORITAS DE LAS FORMACIONES DE ORIGEN CONTINENTAL

Estas formaciones evaporíticas están limitadas a los Terciarios, siendo su distribución muy irregular, según las diferentes cuencas sedimentarias, tal como se comentó en el apartado sobre «generalidades de las formaciones evaporíticas en España». Quizá por ello la manera más adecuada de referir estas formaciones es por cuencas, y dentro de ellas seguir un orden estratigráfico.

Cuenca del Ebro y zona alóctona surpirenaica (Prepirineo)

La figura 9 es un intento de síntesis, sin escala, de las principales formaciones evaporíticas presentes en el Terciario de la cuenca del Ebro (s.l.).

Sulfato cálcico. Excepto algunas pequeñas formaciones del Mioceno de la margen S de la cuenca, que aún preservan yeso primario, el resto de unidades sulfatadas continentales afloran como yeso secundario. Las más antiguas corresponden al Paleoceno (facies Garumn) del Valle de Ager y de la cuenca del Tremp, localidad esta última donde han sido explotadas en canteras (García Veigas, 1988). Durante el Eoceno se sedimentaron diferentes horizontes evaporíticos marginales en la zona de contacto entre el borde SE de la cuenca del Ebro y los Catalánides, que han sido ampliamente explotados, tanto para la fabricación de yeso y escayolas como para la talla del alabastro, actividad ésta última desarrollada en las localidades de Sarral y Pira (Tarragona). Tales horizontes corresponden principalmente al «Complejo de Uldemolins» (Colombo, 1986), que presenta en diversas unidades abundantes meganódulos de sílex, así como a los Yesos de Copons (Barcelona), estos últimos explotados muy intensamente.

En relación con los estadios finales de la cuenca potásica surpirenaica se desarrollan, ya en ambientes continentales, los Yesos de Barbastro (en Cataluña y Aragón), al techo del Eoceno, y los de Puente la Reina (Navarra), ya en la base del Oligoceno. Ambos han sido intensamente explotados en ambas zonas, especialmente los navarros por su mayor pureza.

Durante el Oligoceno se sedimentan series yesíferas muy potentes en Navarra (Fms. Yesos de Falces y Yesos de Lerín; Ortí y Salvany, 1986; Salvany, 1989), de hasta casi mil

(zona de San Adrián) y La Rioja (zona de Alcanadre-Arrúbal) se encuentran hoy abandonadas. Son conocidas capas de glauberita en la base de las capas salinas de la Fm. Zaragoza (Mandado, 1987). Finalmente, existen importantes explotaciones de glauberita en la unidad Yesos de Cerezo (Menduiña *et al.*, 1984), las de Crimidesa y Minera de Santa Marta, aunque allí la sal no ha sido citada.

Cuenca del Tajo, Depresión Intermedia y zona de La Mancha

La figura 10 es un intento de síntesis de los principales cuerpos evaporíticos existentes en la cuenca del Tajo, aflorantes o conocidos por sondeos o por líneas sísmicas, y tanto del sector principal, es decir el occidental o de Madrid, como del más oriental (Depresión Intermedia), quedando ambos separados por la Sierra de Altomira. Al igual que en la depresión del Ebro, la historia evaporítica de esta gran cuenca intracratónica es larga y variada.

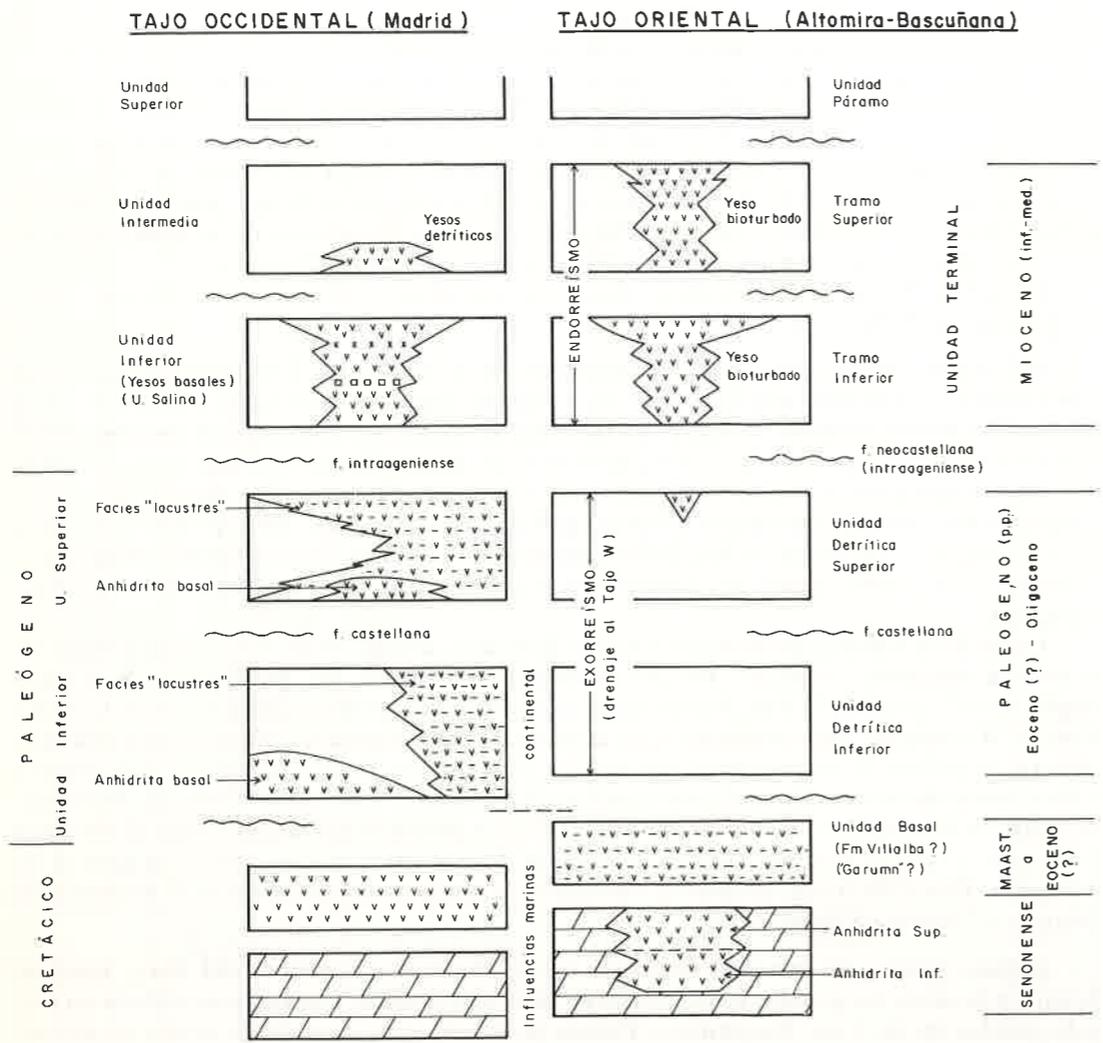


FIG. 10. Esquema general muy simplificado y sin escala, de las principales formaciones evaporíticas desarrolladas en el Terciario de la cuenca del Tajo (según Ortí, 1988, fig. 4).

Sulfato cálcico.—En el apartado de formaciones marinas evaporíticas ya se hizo referencia al zócalo de anhidritas del Cretácico superior que se extiende bajo la cuenca terciaria del Tajo, y que aflora únicamente la Fm. Villalba como yesos nodulares tanto en Sierra de Altomira como en el margen occidental de la Serranía de Cuenca. La zona N de la cuenca del Tajo muestra importantes formaciones yesíferas de posible edad oligocena (otras dataciones más antiguas aún no pueden ser totalmente desechadas) en las áreas de Jadraque, Cogolludo y Torrelaguna, con litofacies masivas, bioturbadas, laminadas, nodulares, meganodulares y localmente detríticas, que han sido objeto también de explotaciones, tratándose siempre de yesos secundarios. Merece ser resaltada la industria del alabastro en Jadraque. En profundidad, es conocida la existencia de importantes intercalaciones anhidríticas en el Paleógeno del Tajo occidental (Madrid) (fig. 8), alguna de las cuales podría, hipotéticamente, corresponderse con los afloramientos de la zona de Jadraque y con los situados a ambos lados de la Sierra de Altomira (ENRESA, 1987).

Durante el Mioceno se presenta, por el contrario, una importante y generalizada sedimentación evaporítica. En la cuenca oriental, mucho más diluida que la occidental, ésta consiste predominantemente en yesos primarios microlenticulares del tipo bioturbado y con sílex, y en menor proporción, yesos detríticos y lenticulares intersticiales («tramo inferior» de la Unidad Terminal, de Torres *et al.*, 1985), que han sido objeto de algunas explotaciones (Córcoles, Huete, Loranca, etc.), al ser localmente de gran pureza (Sánchez, 1979). La unidad equivalente en la cuenca occidental (Unidad inferior, o Yesos Basales, o Unidad Salina) es una extensa formación de yesos secundarios, megacrystalinos y alabastrinos, con litofacies laminadas y nodulares (además de seleníticas localmente), que por debajo de su área de afloramiento contiene facies evaporíticas de alta concentración. Los yesos de esta unidad han sido extensamente explotados en muchas canteras de diversas zonas (Fuentidueña, Añoover de Tajo, etc.), y pueden proceder tanto de la hidratación de anhidrita como del reemplazamiento de glauberita (como ejemplo de este último caso puede citarse la cantera de Borox).

Superiormente a estas unidades yesíferas se desarrolla el «tramo superior» de la Unidad Terminal en la cuenta oriental, nuevamente con yesos bioturbados primarios, y la Unidad Intermedia en la cuenca occidental. Esta última contiene niveles de yesos primarios, tanto detríticos (explotados en Chinchón, Villarrubia, Huerta de Valdecarábanos, etc.) como microlenticulares bioturbados con sílex, y localmente yesos secundarios meganodulares (Añoover de Tajo) de gran interés para las explotaciones.

Para un conocimiento general de las formaciones yesíferas del conjunto de la cuenca del Tajo resulta muy útil el tabajo de Torres *et al.* (1985), y en concreto para la calidad de los yesos el de Sánchez Jiménez (1979). Por la zona manchega se extienden ampliamente los yesos primarios (microlenticulares y bioturbados) existentes en la Depresión Intermedia, habiendo sido extraídos en numerosas canteras de muchas localidades (Santa María del Campo Rus, etc.). Continúan hacia el E hasta la cuenca del Júcar, donde también existen explotaciones de estos tipos de yesos (Valdegangas; Santos, 1984).

Cloruro sódico y sulfatos sódicos.—En cantidades significativas, tanto la sal como el sulfato sódico parecen estar restringidos a la Unidad Inferior de la cuenca del Tajo occidental. Resulta evidente la existencia de una dilución acusada de las facies evaporíticas de la Depresión Intermedia frente a las de la cuenca del Tajo occidental (Utrilla *et al.*, 1987). En la referida Unidad Inferior, la sal es conocida en mina y sondeos en Villarrubia de Santiago (Toledo), donde Ríos (1963) cita las antiguas labores de sal, previamente a la extracción actual de sulfato sódico. Se trata, en general, de capas de sal de varios metros intercaladas entre capas de glauberita en la mina de El Castellar. En los sondeos las capas de sal no suelen ser tan potentes y alternan con capas de anhidrita, glauberita y, a partir de cierta profundidad, incluso con polihalita (Ortí *et al.*, 1979; Ortí y Pueyo, 1980; García del Cura *et al.*, 1979). Las capas de sal y glauberita observables en la mina de El Castellar (hoy perteneciente a FORET, S. A.) quedan coronadas por una potente capa de thenardita del orden decamétrico, que se explota intensamente. En otros puntos de la cuenca se explotan

las capas de glauberitas (por SULQUISA, en Villaconejos), o fueron anteriormente explotadas (Mina Consuelo y otras, en San Martín de la Vega).

No puede descartarse la existencia de sal en profundidad en el seno de las formaciones paleógenas del Tajo occidental, debido a las asociaciones de facies que estas litologías exhiben. Así, Sánchez Jiménez (1979) cita la existencia de ciertas cantidades de sal y glauberita en los sondeos de reconocimiento de los yesos de las zonas de Jadraque y Cogolludo, antes referidas.

Cuencas de Calatayud y Teruel

En el Mioceno de la cuenca de Calatayud el esquema de formaciones evaporíticas es muy similar al de la cuenca del Ebro, aunque más simplificado, y su interés está prácticamente limitado al sulfato cálcico. En esta fosa terciaria el yeso ha sido, no obstante, tradicionalmente utilizado en bloques para la construcción de viviendas (mampostería).

Existe también, como en la cuenca del Ebro, una clara diferencia entre las zonas yesíferas periféricas de la cubeta, con yesos primarios microlenticulares y gipsareníticos (y más ocasionalmente nodulares) ricos en sílex, y las zonas centrales, con facies laminado-nodulares de alta concentración, hoy transformadas en yeso secundario en superficie. Un perfil NW-SE muestra dicha situación desde Calatayud hasta la zona de Montón-Villafeliche, siguiendo hacia el S el curso del Jiloca (fig. 11). En la zona de tránsito de unas facies a otras se localizan yacimientos abundantes de meganódulos alabastrinos (canteras de Fuentes de Jiloca), intensamente explotados para la obtención de escayolas y como alabastrinos (fig. 11), siendo éste un ejemplo válido para otras cuencas. Sin embargo, la existencia de megacristales secundarios en los meganódulos impide en ocasiones su utilización directa como alabastrinos. También a lo largo del río Perejiles, algo más al E que el Jiloca, existen numerosas explotaciones pequeñas de yeso, entre Torres y Miedes.

Ríos (1963) cita la extracción de sulfato magnésico (epsomita) como eflorescencias en cuevas próximas a Calatayud. Igualmente Collantes y Griffó (1982) citan la presencia de niveles de halita y epsomita en el Mioceno del centro de la cubeta. Estos aspectos son poco conocidos por nosotros, aunque es evidente que debido al tipo de facies del núcleo central de la unidad Yesos de Calatayud (es decir, lagos someros con yesos de litofacies laminado-nodulares, en todo similares a los de la Fm. Zaragoza), lógicamente pueden tener en profundidad intercalaciones de halita y de sales sódicas.

En la zona de Calamocha y Montalbán existen también algunas canteras de yeso en Navarrete, Bañón y Martín del Río (este último depósito considerado de edad oligocena), principalmente del tipo lenticular intersticial y detrítico.

Por el contrario, en la cuenca terciaria de Teruel (fosa de Alfambra-Teruel-Ademuz) el sulfato cálcico es el único material conocido en sus diferentes formaciones evaporíticas. Estas se caracterizan, a su vez, por la absoluta dominancia del yeso primario en diferentes facies de gramo fino (microlenticular, gipsarenítico, detrítico, ...), faltando prácticamente el yeso secundario en las formaciones neógenas. Han sido explotados ampliamente los yesos masivos de la unidad de Los Aljezares (Turolense), que se extienden desde el S de Teruel al N de Cuevas Labradas. No existen prácticamente explotaciones de yeso en la unidad (o unidades) de Libros-Cascante del Río (Aragoniense-Vallesiense), aunque son conocidas en Libros las antiguas explotaciones de azufre elemental en relación con estas evaporitas. Existen intercalaciones yesíferas paleógenas menores en Sierra Palomera, y pliocenas en Orrios.

Cuenca del Duero

La sedimentación evaporítica parece afectar únicamente al relleno neógeno de esta vasta cuenta, y aún tan sólo a las Unidades inferior y media de Mediavilla y Dabrio (1986), correspondientes al Mioceno medio y superior (Fm. Cuesta). Se trata exclusivamente de yesos primarios, tanto detríticos como lenticulares-intersticiales, así como seleníticos. Al igual que en otras cuencas, como la de Teruel, esta sedimentación yesífera miocena no ha

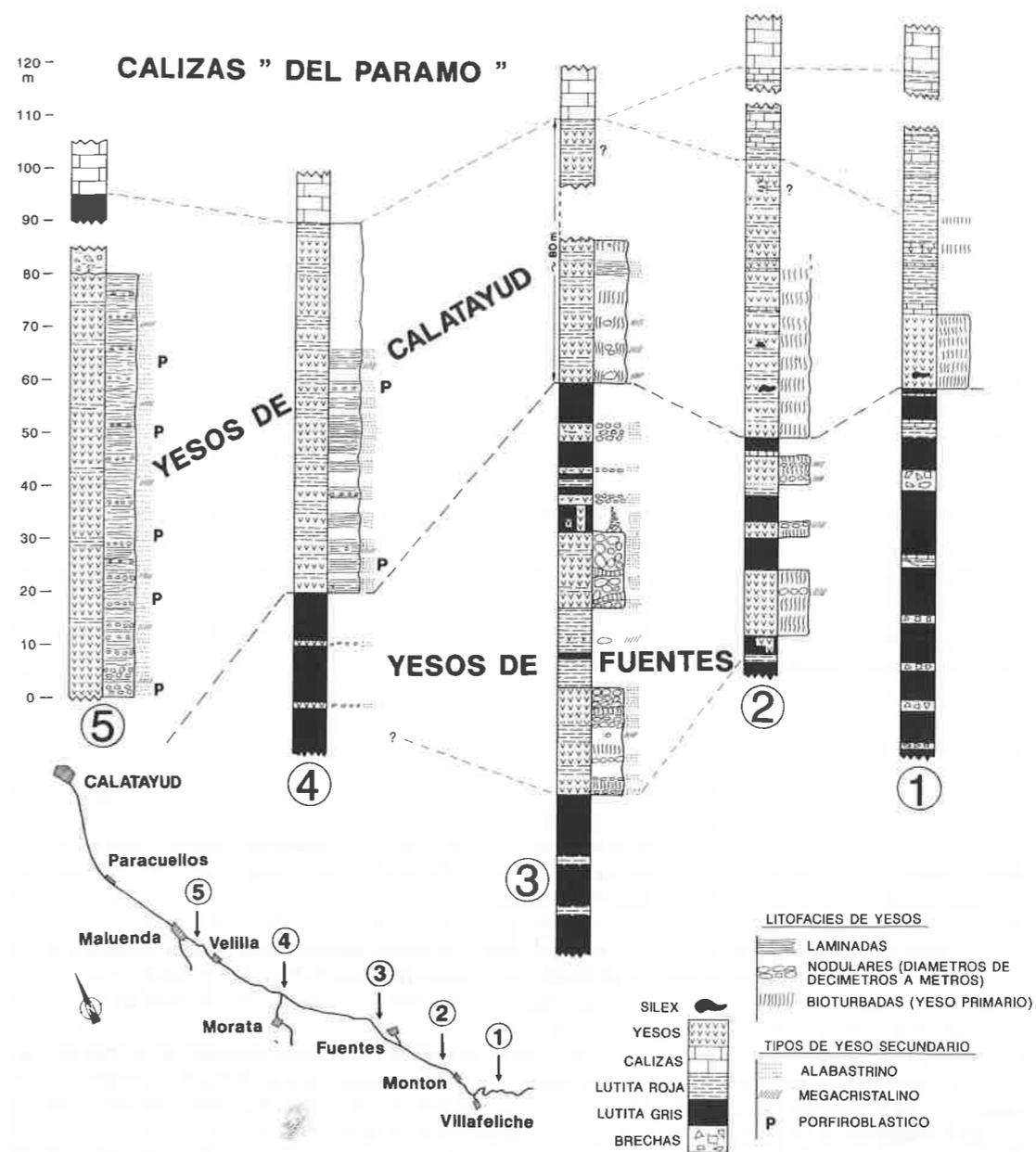


FIG. 11. Correlación estratigráfica e indicación de facies yesíferas entre las zonas de borde y de centro, en los Yesos de Calatayud (modificado de Ortí, F., 1987b, fig. 11).

sufrido nunca anhidritización, ni presenta indicios de sal ni de sulfatos sódicos ni otras sales solubles, lo que nos habla de la baja concentración de sus soluciones evaporíticas.

Las dos zonas de mayor importancia yesífera se localizan en las inmediaciones de Palencia (Torquemada-Cerrato-Baltanas), y al S y SE de Valladolid (Iscar-Quintanilla de Onésimo). Mediavilla (1986-87) ha presentado un estudio sedimentológico de los yesos vallesienses correspondientes al sector de Palencia, destacándose el carácter detrítico de estas formaciones, y el control estructural de su sedimentación.

Además de las labores a cielo abierto, son frecuentes las extracciones subterráneas por el método de cámaras y pilares, beneficiándose las facies de grandes cristales lenticulares de

crecimiento intersticial, que suelen referirse como «espejuelo», y en el que son frecuentes las maclas en punta de flecha. En otras zonas, aunque la potencia del tramo yesífero puede llegar hasta los 100 m, en general los niveles explotables no superan la decena de metros. Debido a la abundancia de matriz arcillosa o margosa, la pureza de estas capas es limitada.

Existen también algunas pequeñas explotaciones a cielo abierto en el área de Villatoro, cerca de Burgos. En el corredor de la Bureba, en la zona de enlace entre las cuencas del Duero y Ebro, se desarrolla la importante unidad evaporítica miocena conocida como Yesos de Cerezo, a la que se ha hecho referencia en el apartado correspondiente de la cuenca del Ebro.

Otras cuencas

Las formaciones yesíferas continentales son conocidas en los Neógenos de algunas cuencas béticas, aunque ofrecen poco interés como explotación de sulfato cálcico. Son conocidos los depósitos yesíferos de la Unidad Superior, de la cuenca de Granada (Dabrio *et al.*, 1982), así como los yesos y las margas yesíferas de la cuenca de Baza. Igualmente existen algunas formaciones yesíferas cerca de Caravaca, en Campo Coy, y al NE de Totana. En general, la actividad extractiva en ellas es mínima o ha sido nula. No hay indicios de presencia de sal, excepto en el caso de Granada, como ya se vio en el apartado sobre «recursos en evaporitas de las Formaciones de Origen marino».

Puntualmente también se conocen depósitos yesíferos en la cuenca neógena de Valencia y en otras muchas cuencas miocenas de las provincias de Albacete (Minas de Hellín, donde el yeso está asociado a yacimientos de azufre del Tortonense) y Valencia (Yesos de Los Ruices).

Recibido, noviembre 1989.

BIBLIOGRAFIA

- Borchert, H. y Muir, R. O. (1964): «Salt Deposits. The Origin, Metamorphism and Deformation of Evaporites». *Van Nostrand*, London, 338 p.
- Braitsch, O. (1971): «Salt Deposits. Their Origin and Composition». *Springer-Verlag*, Berlín, 297 p.
- Brinkmann, R. y Lögters, H. (1968): «Diapirs in Western Pyrenees and foreland, Spain». In: *Diapirism and diapirs*, AAPG, Mem. 8: 275-292.
- Busquets, P., Ortí, F.; Pueyo, J.; Riba, O.; Rosell, L.; Sáez, A.; Salas, R. y Taberner, C. (1985): «Evaporite deposition and diagenesis in the Saline (Potash) Catalan Basin, Upper Eocene». *Exc. Guide-book, VIth European Regional Meeting*, Lérida, abril 1985; Exc. n.º 1: 11-59.
- Castillo Herrador, F. (1974): «Le Trias évaporitique des bassins de la Vallée de l'Ebre et de Cuenca». *Bull. Soc. Géol. France*, 7.^a serie, 16 (6): 666-675.
- Colombo, F. (1986): «Estratigrafía y sedimentología del Paleógeno continental del borde meridional occidental de los Catalánides (prov. Tarragona, España)». *Cuad. Geol. Ibérica*, 10:5-115.
- Collantes, L. P. y Griffo, J. L. (1982): «Panorámica general del yeso en España. Los yesos de la cubeta de Calatayud en la provincia de Zaragoza». *Tecniterrae*, 8, n.º 6: 53-63.
- Dabrio, C.; Martín, J. M. y Megías, A. G. (1982): «Signification sédimentaire des évaporites de la dépression de Grenade (Espagne)». *Bull. Soc. Géol. France*, (7), n.º 4: 705-710.
- Dellwig, L. F. (1955): «Origin of the Salina Salt of Michigan». *Jour. Sedim. Petrol.*, 25:83-110.
- Elorza, J. J. y Rodríguez-Lázaro, J. (1984): «Late Cretaceous quartz geodes after anhydrite from Burgos, Spain». *Geol. Mag.*, 121(2):107-113.
- ENRESA (1987): «Inventario Nacional de formaciones geológicas favorables para el almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad (Fase 1.^a)». Madrid (inédito).
- García del Cura, A.; Ordóñez, S., y López-Aguayo, F. (1979): «Estudio petrológico de la "Unidad Salina" de la Cuenca del Tajo». *Estud. Geol.*, 35: 325-339.
- García Veigas, J. (1988): «La formación evaporítica de la facies Garumniense de la Conca de Tremp (Lleida): petrología, geoquímica y sedimentología». Tesis de Licenciatura, Univ. Autónoma de Barcelona, 175 p.
- Gil, A.; Fernández, J., y López-Garrido, A. C. (1987): «Evolución de facies en el Triás de la zona prebética y borde de Meseta. Transversal Orcera-Puente Genave (provincia Jaén)». *Cuader. Geol. Ibérica*, 11: 403-420.

- Hardie, L. A. (1968): «The origin of the recent non-marine evaporite deposit of Saline Valley, Inyo Country, California». *Geochimica Cosmochimica Acta*, 32: 1279-1301.
- IGME (1974): «Estudio sectorial de yesos. Zona Valle del Duero y Cuenca alta del Ebro». Plan Nacional de Minería, Madrid (informe inédito).
- IGME (1982): «Ampliación de la investigación de pizarras bituminosas en la zona de Lorca (Murcia) (Fase II). Inscripciones números Lorca 134 (Murcia) y Lorca bis 155 (Murcia)». Madrid, 116 págs. (inédito).
- IGME (1986): «Panorama Minero, 1986». Madrid, 411 p.
- Jurado, M. J. (1989): «El Triásico del subsuelo en la cuenca del Ebro». Tesis Doctoral, Univ. Barcelona, 259 p.
- Macau, F., y Riba, O. (1965): «Situación, características y extensión de los terrenos yesíferos en España». I Coloq. sobre las Obras Públicas en los terrenos yesíferos, t. V: 28 págs. Madrid, 1962.
- Mandado, J. (1987): «Litofacies yesíferas del Sector Aragonés de la Cuenca Terciaria del Ebro. Petrogénesis y Geoquímica». Tesis doctoral, Univ. Zaragoza, 443 págs.
- Martínez del Olmo, W.; Leret, G., y Suárez, J. (1986): «La estructuración diapírica del sector Prebético». *Geogaceta*, 1: 43 y 44.
- Mediavilla López, R. (1986-87): «Sedimentología de los yesos del sector central de la Depresión del Duero». *Acta Geológica Hispánica*, 21-22: 35-44.
- Mediavilla, R. M.^a y Dabrio, C. (1986): «La sedimentación continental del neógeno en el sector centro-septentrional de la depresión del Duero (provincia de Palencia)». *Studia Geol. Salmant.*, 22: 111-132.
- Meléndez, F. (1975): «Correlación del Cretácico de la Serranía de Cuenca con el del sondeo Villanueva de los Escuderos-I (Cuenca)». *Actas Primer Symp. Cret. Cord. Ibérica*, Cuenca, G. E. M.-Caja Ahor. Prov. Cuenca, págs. 85-97.
- Meléndez, A.; Meléndez, F.; Portero, J., y Ramírez del Pozo, J. (1985): «Stratigraphy, sedimentology and paleogeography of Upper Cretaceous evaporitic-carbonate platform in the central part of the Sierra Ibérica». *Exc. Guidebook 6th European regional meeting*, Lérida, Exc. n.º 5: 187-213.
- Mendiña, J.; Ordóñez, S., y García del Cura, M. A. (1984): «Geología del yacimiento de glauberita de Cerezo de Río Tirón (provincia de Burgos)». *Bol. Geol. y Minero*, 95, I: 33-51.
- Morillo, M.^a J., y Meléndez, F. (1979): «El Jurásico de la Alcarria, La Mancha». *Cuadernos de Geología*, 10: 149-166.
- Ortí, F. (1974): «El Keuper del Levante español». *Estudios Geológicos*, 30: 87-151.
- Ortí, F. (1977): «Aproximación al estudio de las microestructuras de las rocas de yeso secundario y a su origen». *Rev. Inst. Inv. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 32: 87-152.
- Ortí, F. (1982-83): «Sur les conditions de dépôt, la diagenèse et la structure des évaporites triasiques dans l'Est de l'Espagne». *Sciences de la Terre*, 25(2): 179-199.
- Ortí, F. (1987a): «Aspectos sedimentológicos de las evaporitas del Triásico y Liásico inferior en el E. de la Península Ibérica». *Cuad. Geol. Ibér.*, 11: 363-382.
- Ortí, F. (1987b): «La zona de Vilel-Cascante-Javalambre. Introducción a las formaciones evaporíticas y al volcanismo jurásico». In: M. Gutiérrez y A. Meléndez (Eds.), *XXI Curso de Geología Práctica de Teruel*, p. 56-95, Univ. Verano de Teruel.
- Ortí, F. (1988): «Sedimentación evaporítica continental durante el Terciario en la Península Ibérica: aspectos generales». II Cong. Geol. España. Vol. Simposios, Granada, S.G.E., págs. 509-518.
- Ortí, F. (1989): «Evaporitas marinas». In: *Sedimentología*, A. Arche, Editor, CSIC, págs. 89-177.
- Ortí, F., y Pueyo, J. J. (1976): «Yeso primario y secundario del depósito de Vilobí (prov. Barcelona, España)». *Rev. Inst. Inv. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 31: 5-34.
- Ortí, F., y Shearman, D. D. (1977): «Estructuras y fábricas deposicionales en las evaporitas del Mioceno Superior (Messiniense) de San Miguel de Salinas (Alicante, España)». *Rev. Inst. Inv. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 32: 5-53.
- Ortí, F., Pueyo, J. J. y San Miguel, A. (1979): «Petrogénesis del yacimiento de sales sódicas de Villarrubia de Santiago (Terciario continental de la cuenca del Tajo)». *Bol. Geol. y Minero*, 94: 347-372.
- 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. (1981): «Fábricas cristalinas de la anhidrita nodular y laminada». *Acta Geológica Hispánica*, 16(4): 235-253.
- Ortí, F., y Busson, G. (edits.) (1984): «Introducción a la sedimentología de las salinas marítimas de Santa Pola (Alicante, España)». *Rev. Inv. Geol.*, vol. 38-39, 235 págs.

- Ortí, F., y Salvany, J. M. (1986): «Programa de investigación de las formaciones evaporíticas en Navarra». *Serv. Rec. Hidrológicos y Geología*, Gobierno de Navarra, Vols. 1 y 2 y Anejos (inédito).
- Ortí, F.; Busquets, P.; Rosell, L.; Taberner, C.; Utrilla, R., y Quadras, M. (1987-88): «La fase evaporítica del Eoceno medio (Luteciense) en la cuenca surpirenaica catalana. Nuevas aportaciones». *Rev. Inv. Geol.*, 44-45 (en prensa).
- Ortí, F.; Rosell, L.; Utrilla, R.; Inglés, M.; Pueyo, J., y Pierre, C. (1988a): «Reciclaje de evaporitas en la Península Ibérica durante el ciclo alpino». II Cong. Geol. España, Granada, *Libro Comunicaciones*, vol. 1: 421-424.
- Ortí, F.; Pueyo, J.; Rosell, L.; Inglés, M.; Utrilla, R., y Pierre, C. (1988b): «Estudio sedimentológico, geoquímico e isotópico de las formaciones evaporíticas peninsulares. El reciclaje de evaporitas marinas mesozoicas, eocenas y messinienses en las terciarias continentales». *Memoria final Proyecto CAICYT*, núm. 2153/83, 388 págs. (inédito).
- Ortí, F.; Salvany, J. M.; Rosell, L.; Pueyo, J., y Veigas, J. G. (1989a): «Paleogene and Miocene evaporite deposition in the Ebro Basin and South-Pyrenean foreland». In: G. Busson and Ch. Schreiber (eds.): *The Paleogene evaporite deposits of Eastern France and Northern Spain: basin relationships, stratigraphy, lithology and a comparison with recent evaporites*. Columbia Univ. Press (en prensa).
- Ortí, F., Salvany, J. M., Rosell, L. e Inglés, M. (1989b): «Sistemas lacustres evaporíticos del Terciario de la cuenca del Ebro». *Geogaceta*, 6: 103-104.
- Ortí, F. y Salvany, J. M. (Eds.): «Formaciones evaporíticas de la Cuenca del Ebro y cadenas periféricas, y de la Zona de Levante. Nuevas aportaciones y guía de superficie». ENRESA-Univ. Barcelona (en preparación).
- Pérez Arlucea, M. (1985): «Estratigrafía y sedimentología del Pérmico y Triásico en el sector Molina de Aragón-Albarracín». Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 322 p.
- Pueyo, J. J. (1975): «Estudio petrológico y geoquímico de los yacimientos potásicos de Cardona, Suria, Sallent y Balsareny (Barcelona, España)». Tesis Doctoral, Univ. Barcelona, 351 p.
- Puga, E., Díaz de Federico, A., Morten, L. y Bargossi, G. M. (1984-85): «La Formación Soportujar del Complejo de Sierra Nevada: caracterización petrológica y geoquímica». *Cuad. Geología*, 12: 61-89.
- Puigdefábregas, C. (1975): «La sedimentación molásica en la Cuenca de Jaca». C.S.I.C., Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos, núm. 104, número extraordinario de la revista *Pirineos*, 188 p.
- Puigdefábregas, C., Muñoz, J. A. y Marzo, M. (1986): «Thrust belt development in the eastern Pyrenees and related depositional sequences in the southern foreland basin». *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, 8:229-246.
- Ràfols Rovira, J. M.^a (1984): «El agua de mar, fuente de materias primas para la industria química». II Seminario de Química Marina. Cádiz, 17 y 18 enero 1984.
- Riba, O. (1964): «Estructura sedimentaria del Terciario continental de la Depresión del Ebro en su parte riojana y navarra». Aport. XX Cong. Geogr. Inter., Londres, pp. 127-138. Madrid.
- Riba, O. (1975): «Introduction. Le bassin tertiaire catalan espagnol et les gisements du Potasse». *Livret-Guide de l'Excursion n.º 20. IX Congrès International de Sédimentologie*. Nice, p. 9-13.
- Riba, O., Ramírez del Pozo, J. y Maldonado, A. (1975): «Mapa Geológico de España, E 1:50.000, 2.^a serie, 1.^a ed. Hoja n.º 330 «Cardona» y «Memoria Explicativa», I.G.M.E., Servicio de Publicaciones del Min. de Industria.
- Ríos, J. M.^a (1963): «Materiales salinos del suelo español». *Memoria n.º 64*. IGME, 166 pág. Madrid.
- Ríos, J. M. (1968): «Saline deposits of Spain». *Geol. Soc. America Spec. Paper n.º 88*:59-82.
- Rocamora, J., y Ràfols, J. M.^a (1966): «Salt plants of Torre Vieja (Spain) and their operation». II Symp. on Salt, Edit. by J. L. Rau. Mayo 1965, Vol. II: 140-151.
- Rocamora, J., y Ràfols, J. M.^a (1978): «Sea salt production at Torre Vieja, La Mata, Pinoso, Spain». 5th Symposium on salt, vol. 2, Edits.: A. H. Coogan and L. Hauber. Publ. Northern Ohio Geol. Soc., Inc.
- Rosell, L. (1983): «Estudi petrològic, sedimentològic i geoquímic de la formació de sals potàssiques de Navarra (Eocè superior)». Tesis Doctoral, Univ. Barcelona, 321 p.
- Rosell, L. y Ortí, F. (1981-82): «The Saline (Potash) formation of the Navarra Basin (Upper Eocene, Spain). Petrology». *Rev. Inst. Inv. Geol. Dip. Prov. Barcelona*, 35:71-121.
- Sáez, A. (1987): «Estratigrafía y sedimentología de las formaciones lacustres del tránsito Eoceno-Oligoceno del NE de la Cuenca del Ebro». Tesis Doctoral, Univ. Barcelona, 353 p.

- Salvany, J. M.^a (1989): «Las formaciones evaporíticas del Terciario continental de la cuenca del Ebro en Navarra y La Rioja: estudio petrológico y sedimentológico». Tesis doctoral, Univ. Barcelona.
- Salvany, J. M.^a, y Ortí, F. (1986): «Ciclos evaporíticos en la Fm. Lerín, Oligoceno-Mioceno basal, cuenca del Ebro (Navarra)». XI Cong. Nac. Sedimentología, Barcelona, sept. 1986 (Abstracts).
- Salvany, J. M.^a, y Ortí, F. (1987): «El Keuper de los Catalánides». *Cuad. Geol. Ibérica*, 11: 215-236.
- Sánchez Jiménez, A. (1979): «Estudio geoeconómico de los yesos de la zona Centro de España». Tesis doctoral, Univ. Zaragoza, 274 págs.
- Santos García, J. A. (1984): «Interpretación de un episodio evaporítico en Valdeganga». I Cong. Españ. Geología, t. I: 247-258.
- Serrano, A.; Martínez del Olmo, W., y Cámara, P. (1989): «Diapirismo del Triás salino en el dominio Cántabro-Navarro». *Libro Homenaje a R. Soler*, AGGEP. Madrid, págs. 115-121.
- Suárez, J.; Leret, G., y Martínez del Olmo, W. (1985): «Keuper evaporitic sequence from SE Spain». 6th European reg. Meeting Sedimentology, IAS, Abstracts book: 447-450.
- Torres T.; Junco, F.; Zapata, J. L., y Plaza, J. (1985): «Similitud de los procesos sedimentarios del Neógeno en la cuenca del Tajo y en la Depresión Intermedia». *I Cong. Esp. Geología*, t. I: 258-300.
- Utrilla, R. (1989): «Les composicions isotòpiques ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$) del sulfat, com a indicadors de l'origen de les evaporites del Mesozoic i del Cenozoic de la Península Ibérica i les Illes Balears». Tesis doctoral, Univ. Barcelona, 276 págs.
- Utrilla, R.; Pierre, C.; Ortí, F.; Rosell, L.; Inglés, M., y Pueyo, J. (1987): «Estudio isotópico de los sulfatos en formaciones evaporíticas mesozoicas marinas y terciarias continentales. Aplicación a la cuenca del Tajo». II Cong. Geoquímica, Soria, Libro de Comunicaciones: 91-94.
- Vail, P. R. (1981): «Cenozoic sea-level changes: Introduction to Colloquy 3. Geology of Continental Margins». *26th Int. Geol. Congr. París*.
- Vázquez Guzmán, F. (1983): «Depósitos minerales de España». IGME, 153 págs.