



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

**boletín**

**geológico**

**y minero**

29 MAR 1998



VOLUMEN 109

Mayo - Junio 1998

NUMERO 3



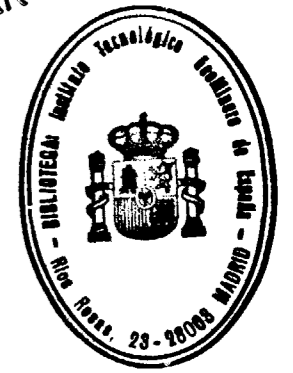
Volumen 109

Número 3

Mayo-Junio 1998

# boletín geológico y minero

25 MAR 1999



revista bimestral de geología, minería y ciencias conexas fundada en 1874 - 5.ª serie

## Sumario

<b>Geología</b>	R. P. LOZANO y A. RODRIGO: Procesos de mineralización en fósiles del Cretácico Superior de Olazagutia (Navarra). . . . .	3
	J. M. DIAZ CURIEL, M.ª J. MIGUEL, S. DOMINGUEZ y N. CAPARRINI: Correlación automática de sondeos mediante diagrfias en el sur de la cuenca del Duero. . . . .	15
	C. IÑIGO: A new macrodont anchithere (Equidae) from the late Aragonian (Miocene) of Madrid (Spain). . . . .	31
<b>Geofísica</b>	F. M. RUBIO y J. L. PLATA: Proceso de datos gravimétricos en el proyecto integrado de estudio geológico y metalogenético de la Faja Pirítica. . . . .	39
	J. L. CUEVAS OJEDA: Estudios sobre la isostasia en Cuba: Una caracterización y delimitación de zonas potencialmente sísmicas. . . . .	53
<b>Ingeniería Geoambiental</b>	L. J. FERNANDEZ GUTIERREZ DEL ALAMO y J. I. DIAZ DE VILLAFRANCA GARCIA: Evaluación informática cuantitativa de la alteración en el color de un paisaje. Aplicación al caso de una labor minera de superficie. . . . .	67
<b>Rocas Industriales y Ornamentales</b>	P. GUMIEL y J. M. BALTUILLE: Análisis geométrico de sistemas de fracturación en canteras de rocas ornamentales. Aplicación de análisis fractal en la cantera de "El Venero" (Cadalso de los Vidrios, Madrid). . . . .	77
	R. CASTELLO MONTORI: Composición de los morteros empleados en la construcción de la Catedral de Jaca. . . . .	87
<b>Información</b>	A. DAZA SANCHEZ: Síntesis minera y calzadas romanas de Belmez-Villaviciosa. . . . .	95

**DIRECCION Y ADMINISTRACION**

Ríos Rosas, n.º 23 - 28003-Madrid

Fax 91 349 57 62



Ministerio de Medio Ambiente

## PROCESOS DE MINERALIZACION EN FOSILES DEL CRETACICO SUPERIOR DE OLAZAGUTIA (NAVARRA).

Por R. P. LOZANO (\*) y A. RODRIGO (\*)

### RESUMEN

Con motivo del muestreo de material destinado a las colecciones del Museo Geominero (ITGE), los autores de este trabajo tuvieron la oportunidad de recoger una gran cantidad de ejemplares fósiles del Cretácico Superior (equínidos, bivalvos, gasterópodos y esponjas) en los que se observaron rellenos geopetales muy frecuentes y señales evidentes de procesos de mineralización. Por ejemplo, varias generaciones de calcita y de cuarzo (calcedonia y megacrístales), así como sulfuros (marcasita y pirita) y sulfatos (celestita y yeso) asociados a microambientes reductores y oxidantes, respectivamente. La fuente de sílice estaría asociada al reemplazamiento de espículas de esponja por calcita, mientras que la desestabilización de estructuras orgánicas formadas originalmente por aragonito podría ser la causa del aporte del Sr requerido para la formación de celestita. El origen del Fe de los sulfuros estaría relacionado con los fangos terrígenos del fondo marino.

*Palabras clave:* Cretácico Superior, Fosildiagénesis, Mineralización, Navarra, España.

### ABSTRACT

During the sampling of material for the collections of the Geominero Museum (ITGE), a great variety of fossils from Upper Cretaceous age (echinoids, pelecypods, gastropods and sponges) with evident proof of mineralization processes and geopetal fillings, have been collected. Several generations of calcite and quartz (chalcedony, chert and megacrystals), as well as sulphides (marcasite and pyrite) and sulphates (celestine and gypsum) associated with reducing and oxidizing microenvironments, respectively, have been observed. The source of silica would be thus related to the substitution of spicules of sponge for calcite, whereas the destabilization of organic structures originally formed by aragonite could be the determinant factor which made necessary the contribution of Sr for the formation of celestine. The origin of Fe in the sulphides would be associated with the terrigenous muds from the sea floor.

*Key words:* Upper Cretaceous, Fossilization, Mineralization, Navarra, Spain.

### INTRODUCCION: MARCO GEOGRAFICO Y GEOLOGICO

El área muestreada se localiza en la Comunidad Autónoma de Navarra, al sur del pueblo de Olazagutia (fig. 1). El material ha sido recogido en una cantera de margas destinadas a la industria del cemento y explotadas por la empresa Cementos Portland.

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio se sitúa en la parte centro-oriental de la Cuenca Vasco-Cantábrica, constituyendo geo-

morfológicamente la llamada "Llanada Alavesa" (RAMIREZ DEL POZO, 1978). Este área se caracteriza por la presencia de sedimentos margosos del Cretácico Superior con abundantes restos fósiles. La unidad cartográfica en la que se sitúa la cantera de margas está formada por una alternancia irregular de calizas arcillosas (biomicritas arcillosas y micritas fosilíferas) bien estratificadas y margas poco compactas, más abundantes a muro y a techo de la formación. Ha sido datada como Santoniense medio-superior y, en el punto de estudio (fig. 1), corresponde litológicamente a calizas arcillosas y margas con *Micraster* (RAMIREZ DEL POZO, *op. cit.*).

Por otra parte, AMIOT (1982) divide los aflora-

(\*) Museo Geominero, Instituto Tecnológico Geominero de España, Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid.

El Instituto Tecnológico Geominero de España hace presente que las opiniones y hechos consignados en sus publicaciones son de la exclusiva responsabilidad de los autores de los trabajos.

Los derechos de propiedad de los trabajos publicados en esta obra fueron cedidos por los autores al Instituto Tecnológico Geominero de España.  
Queda hecho el depósito que marca la Ley.

### PORTADA:

*Austropotamobius Ilopisi* (Vía), del Cretácico Inferior (Barremiense) de Las Hoyas (La Cierva, Cuenca).  
Colección del Museo Geominero (ITGE, Madrid).

Depósito legal: M. 3.279 - 1958  
ISSN 0366-0176  
NIPO 320-98-001-8

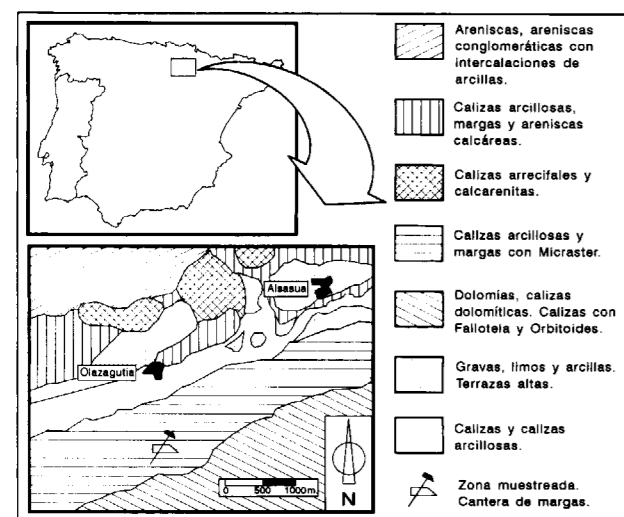


Fig. 1.

Encuadre geográfico y geológico de la zona de estudio.

mientos del Cretácico Superior de la Cuenca Navarro-Cántabra en siete sectores en función de las diferencias existentes entre sus depósitos y su repartición geográfica. El afloramiento situado en la cantera de margas de Olazagutia se incluye en el sector de La Barraca y sus materiales corresponden a la Formación de Olazagutia.

#### ANTECEDENTES

Desde el punto de vista bioestratigráfico, VIERA (1983) realizó un estudio en yacimientos fosilíferos muy próximos a la zona de muestreo, concretamente en el área de Amescoa (Navarra), también situada al S de Olazagutia, determinando un gran número de ejemplares de equínidos, cefalópodos, gasterópodos, bivalvos, esponjas y corales. Otros estudios bioestratigráficos realizados en la Cuenca Navarro-Cántabra basados en ammonoideos e inocerámidos son los realizados por SANTAMARIA y LOPEZ (1996). Por su parte, GALLEMI *et al.* (1997) han propuesto recientemente la sección de Olazagutia como estratotipo para el límite Coniaciense-Santonense basándose en la presencia del inocerámido *Platyceramus undulatoplicatus* (Roemer).

En relación a las mineralizaciones que se tratan en este trabajo, algunas de ellas han sido obser-

vadas en otros sectores de la Cuenca Vasco-Cantábrica. Por ejemplo, anhidrita y yeso silicificados en geodas de cuarzo (ELORZA & RODRIGUEZ-LAZARO, 1984a), celestita silicificada (ELORZA & RODRIGUEZ LAZARO, 1984b) o anhidrita silicificada con rellenos tardíos de celestita y calcita (ELORZA & RODRIGUEZ-LAZARO, 1987).

#### MATERIAL Y METODOS

El material estudiado en el presente trabajo está compuesto mayoritariamente por equínidos de los géneros *Micraster* sp., *Cardiaster* sp. y *Echinocorys* sp., seguidos de escasos bivalvos (*Spondylus* sp.), gasterópodos (*Pleurotomaria* sp.) y espongiarios indeterminados. Asimismo, se han realizado levigados para determinar el contenido micropaleontológico, habiéndose detectado la presencia de numerosos ostrácodos y foraminíferos bentónicos y planctónicos.

En general, los macrorrestos fósiles están muy bien conservados, aunque recubiertos por una delgada pátina margosa que hace necesaria una limpieza previa para la observación de detalle, sobre todo en el caso de los equínidos. En este sentido, los ejemplares se trataron siguiendo diversos procedimientos, como por ejemplo, con una solución de NaOH y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. De este modo, se eliminó una gran cantidad de marga de la superficie de los fósiles y, posteriormente, se continuó el proceso de limpieza sumergiéndolos en una solución muy concentrada de KOH. Este último método ha dado buenos resultados. También se ha utilizado una solución diluida de CIH para la observación de reemplazamientos silíceos en el caparazón de los equínidos.

Se han realizado cortes longitudinales y transversales en aproximadamente 100 fósiles (en su mayoría equínidos) con el fin de observar las texturas que la mineralización genera en el interior de cada uno de ellos, así como las diversas modalidades de relleno existentes. Además, la realización de secciones pulidas y de láminas delgadas ha permitido el estudio de las relaciones entre los diversos minerales. Las diferentes especies minerales se han determinado mediante Difracción de Rayos X (DRX), por el método de polvo, habiéndose diferenciado mineralogías formadas por marcasita, pirita, calcita, variedades

fibrosas de la sílice, etc. Todo el material se encuentra depositado en las colecciones del Museo Geominero de Madrid.

#### PROCESOS DE MARCASITIZACION-PIRITIZACION Y SILICIFICACION

##### Marcasitización-Piritización

La piritización es un proceso de mineralización que supone la incorporación o sustitución de sulfuros de hierro a los restos fósiles. Generalmente se produce en fases de diagénesis temprana, asumiendo que los procesos diagenéticos tempranos son aquellos que tienen lugar antes de la compactación del sedimento y dentro de los primeros metros del sedimento no consolidado (BRETT & BAIRD, 1986).

Los procesos de formación de pirita sedimentaria en medios marinos son relativamente bien conocidos (BERNER, 1984; RAISWELL & BERNER, 1985; BRETT & BAIRD, 1986; CANFIELD & RAISWELL, 1991). En los primeros metros del sedimento, las bacterias que actúan en la descomposición de la materia orgánica generan condiciones anóxicas al consumir el oxígeno contenido en el sedimento. Generalmente, la pirita se forma a pocos centímetros de la interfase sedimento-agua a través de la reacción de minerales detríticos de hierro con H<sub>2</sub>S. Este H<sub>2</sub>S proviene del proceso de reducción de los sulfatos intersticiales por acción bacteriana y reacciona con el Fe detrítico -muy frecuente en medios sedimentarios terrígenos marinos- para formar monosulfuros de Fe esféricos, tales como la mackinawita. Estos monosulfuros son metaestables y, durante la diagénesis temprana, se transforman en pirita. El paso de monosulfuros de hierro metaestables a pirita suele producirse como resultado de la acción bacteriana sobre el H<sub>2</sub>S, que libera azufre a la solución, de manera que el azufre reaccionará con los monosulfuros de hierro para dar lugar a la pirita.

Los factores que condicionan la formación de pirita son: la cantidad de materia orgánica presente en el sedimento, la concentración de sulfatos disueltos y la presencia de minerales detríticos de hierro. En sedimentos marinos normales,

es decir, aquellos depositados en fondos oxigenados, la formación de pirita está limitada principalmente por la cantidad y la reactividad de la materia orgánica contenida en el sedimento, mientras que en sedimentos marinos euxínicos se producen grandes concentraciones de pirita debido al gran suministro de materia orgánica existente y a la abundancia de H<sub>2</sub>S provocada por los procesos de sulforreducción bacteriana. En este último caso, la formación de pirita sólo está controlada por la reactividad de los minerales de hierro.

En relación a las texturas que puede presentar la pirita asociada a los restos fósiles, CANFIELD & RAISWELL (1991) señalan, atendiendo a la cristalinidad, el tamaño y la forma de los cristales, los siguientes tipos:

- *Pirita framboidal y agrupamientos de pirita.* La pirita framboidal está formada por microcristales equigranulares de pirita (cubos o piritoedros) con un diámetro menor de 5 micras, que forman agregados casi esféricos. Es probable que este tipo de textura se desarrolle durante la recristalización de fases precursoras de sulfuros de Fe. Por su parte, los agrupamientos de pirita ("clustered pyrite") son agregados formados por cristales de tamaño variable que se disponen sin orden dando lugar a morfologías más irregulares que las de la pirita framboidal.

- *Agregados de pirita.* Están formados por pequeños cristales de pirita que constituyen agregados grumelares irregulares. Los núcleos de estos agregados son cristales muy finos rodeados por otros más gruesos. Los agregados son menos regulares en tamaño y forma que los framboides y nunca muestran orden cristalino. En ocasiones, los agregados envuelven a la pirita framboidal. El ambiente diagenético requerido para la formación de los agregados no es bien conocido.

- *Pirita laminar.* En lámina delgada se observa como cristales aciculares, mientras que al microscopio electrónico presenta una morfología laminar. Los cristales pueden estar desordenados o presentar una orientación radial. Esta textura aparece tapizando el interior de las cámaras de algunos organismos y también en sus rellenos sedimentarios (HUDSON, 1982). Es posible que

esta textura sea heredada de una marcasita precursora.

Con respecto a la fosilización, un enterramiento rápido produce una gran variedad de reacciones diagenéticas tempranas, tales como la formación de pirita. Los datos tafonómicos indican que la mayor parte de la diagénesis tiene lugar dentro de los microambientes esqueléticos y es anterior a la compactación, produciéndose en los primeros decímetros del sedimento.

### Silicificación

Durante la diagénesis es común la aparición de procesos de silicificación. Estos procesos se pueden manifestar de diferentes formas: recrecimientos sintaxiales de granos de cuarzo detrítico, relleno de porosidades, reemplazamiento de fósiles, etc. Las fuentes de sílice más comunes están relacionadas con la disolución de sílice orgánica: microplancton silíceo (ZIJLSTRA, 1987) o espículas de esponjas (JARVIS *et al.*, 1982), aunque se tiene constancia de otros mecanismos como la alteración de minerales de la arcilla (LEO & BARGHOORN, 1976) y de materiales volcánicos (KASTNER, 1981) o la disolución por presión de granos detríticos de cuarzo (THIRY *et al.*, 1988). La sílice orgánica aparece en la forma de ópalo-A. Debido a la elevada solubilidad del ópalo en medios acuosos, generalmente éste tiende a transformarse en otra forma más estable de ópalo (ópalo-CT), que a su vez tiende a transformarse en cuarzo. Aun así, el ópalo-A puede transformarse directamente en cuarzo (CARSON, 1991).

La silicificación puede desarrollarse desde etapas muy tempranas, anteriores a la cementación carbonática (GEESLIN & CHAFETZ, 1982; ELEY & JULL, 1982), hasta etapas cercanas al límite con ambientes metamórficos, muy posteriores a dicha cementación. La silicificación se podría generar en el límite entre el sedimento óxico y anóxico (ZIJLSTRA, 1987), en zonas donde se produzca una mezcla de aguas marinas con aguas continentales (ASTIN, 1987), e incluso se ha demostrado la precipitación de sílice asociada a la presencia de materia orgánica algar (GAO & LAND, 1991). Son muchos los factores que con-

dicionan el reemplazamiento silíceo de fósiles, aunque se pueden citar entre los más importantes: temperatura, superficie eficaz de reemplazamiento, PH, concentraciones relativas de carbonatos y sílice en el fluido, tipo de estructura cristalina en el caparazón a reemplazar, etc. (CARSON, 1991).

Aunque la sílice puede aparecer en forma de ópalo-CT en procesos de silicificación (IIJIMA & TADA, 1981), éste suele ser el precursor del microcuarzo (CLAYTON, 1982), mucho más frecuente en estos procesos.

Según FOLK & PITTMAN (1971), el cuarzo puede presentar dos texturas diferentes:

- *Megacuarzo*, con un tamaño de grano >20 micras.

- *Microcuarzo*, con un tamaño de grano <20 micras. Esta textura puede manifestarse de dos formas diferentes: a) cuarzo microcristalino equigranular, con un tamaño de grano entre 1 y 4 micras; b) calcedonia, formada por cristales alargados con relación longitud/anchura > 4. A su vez, la calcedonia puede dividirse en calcedonita, cuarcina y lutcita en función de la orientación óptica de los cristales alargados de cuarzo.

Cuando la sílice reemplaza las conchas de los fósiles puede aparecer externamente en forma de anillos de beekita (HUGHS, 1889). Estos anillos están compuestos por rosetas de calcedonia formadas mediante los mecanismos de difusión de "liesegang" (HEDGES, 1932).

### RESULTADOS

A partir del estudio de las secciones pulidas de los fósiles (figs. 2 y 3) se han podido observar diversos rellenos minerales, como por ejemplo la presencia de grandes nódulos de pirita, a veces asociados íntimamente a marcasita y que pueden rellenar total (fig. 2D) o parcialmente (fig. 2B) los fósiles. En gasterópodos, equínidos y bivalvos los sulfuros aparecen sólo de forma puntual en la superficie de los caparazones aunque en los moldes internos lo hacen de una forma mucho más generalizada. Los nódulos de marcasita/pirita

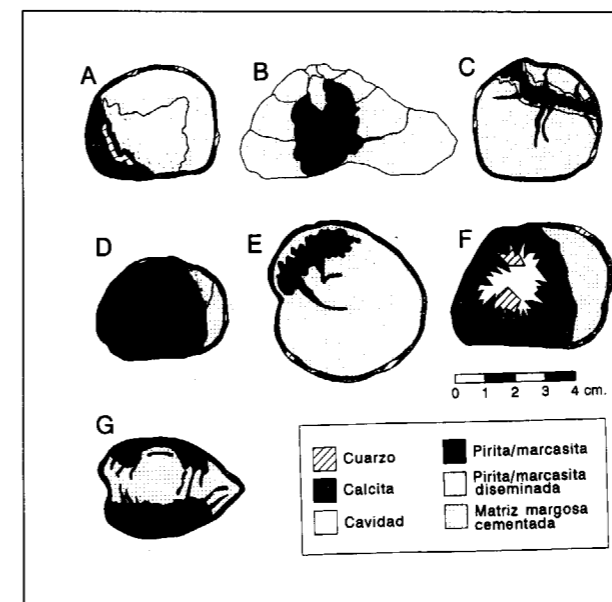


Fig. 2.- Esquema representativo de las secciones pulidas de equínidos (A-F) y bivalvos estudiados (G): A) (1067/2C) Sección longitudinal de *Micraster* sp. B) (1071/1C) Sección longitudinal de molde interno de gasterópodo. C) (1066/2C) Sección longitudinal de *Micraster* sp. D) (1069/1C) Sección longitudinal de *Micraster* sp. E) (1070/2C) Sección transversal de *Micraster* sp. Nótese la deformación de la concha producida por la precipitación de los sulfuros. F) (2881C) Sección longitudinal de *Micraster* sp. G) (1068/2C) Sección longitudinal de *Spondylus* sp.

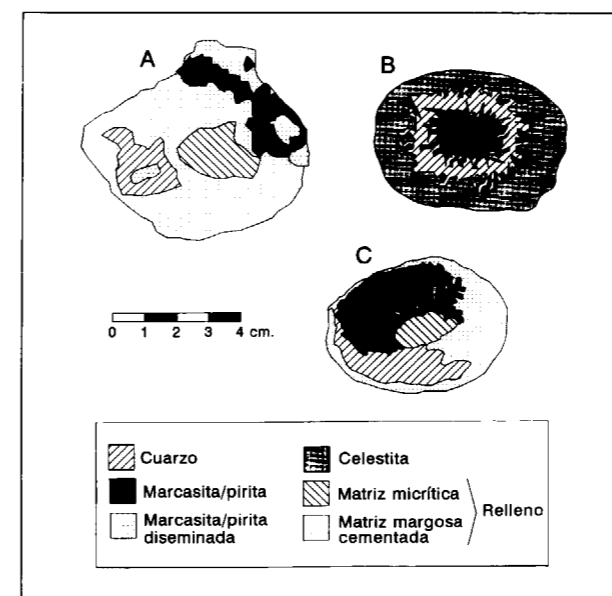


Fig. 3.- Esquema representativo de las secciones pulidas de los espongiarios estudiados. Todas las secciones son transversales. A) (1086/1C). B) (1509/2C). C) (1072/1C).

suelen estar asociados a fracturas del relleno micrítico (fig. 2E). Además, en algunas muestras aparece celestita (fig. 3B), calcita y cuarzo (figs. 2A, 2F), habiéndose observado la presencia de megacristales de estas dos últimas especies rellenando cavidades. En este último caso, la calcita conforma cristales escalenoédricos de crecimiento epitaxial sobre los monocristales del caparazón. Estas calcitas se encuentran recubiertas parcialmente por cristales bipiramidales de cuarzo. Otras veces, la calcita rellena las grietas asociadas a los sulfuros. La celestita, por su parte, únicamente se ha encontrado asociada a las áreas más excéntricas de algunas esponjas.

En la parte externa de los caparazones de los equínidos es frecuente la aparición de reemplazamientos de cuarzo (calcedonia) en forma de anillos de beekita. Estos anillos se sitúan preferentemente agrupados en las áreas ambulacrales y en los límites intra-placa, o bien dispersos sobre la superficie del caparazón (fig. 5a,b). Se han observado rellenos geopetales frecuentes en el interior de equínidos y bivalvos que no han podido ser empleados como criterio de polaridad al no haberse realizado el muestreo capa a capa. Por otro lado, son relativamente frecuentes las evidencias de colonizaciones de organismos epibiontes (serpúlidos y bivalvos, fundamentalmente) sobre la superficie de los equínidos, tanto sobre las placas de calcita sin reemplazar como sobre los anillos de beekita.

El estudio de las láminas delgadas y de los levigados ha permitido detectar la presencia de espículas de esponja reemplazadas en su totalidad por calcita (Lám. I, fig. 3), fragmentos de radiolas de equínidos, secciones de ostrácodos y de foraminíferos bentónicos y multitud de fragmentos de concha indeterminados.

Respecto a las características de la mineralización, el estudio microscópico con luz reflejada revela texturas en empalizada formadas por cristales tabulares de marcasita recubiertos por agregados cristalinos de grano fino de pirita idiomorfa. También aparecen pequeños grupos de cristales de pirita diseminados entre el relleno margoso. Se han observado cristales de marcasita como inclusiones dentro de los agregados de pirita. En equínidos y en bivalvos los nódulos de

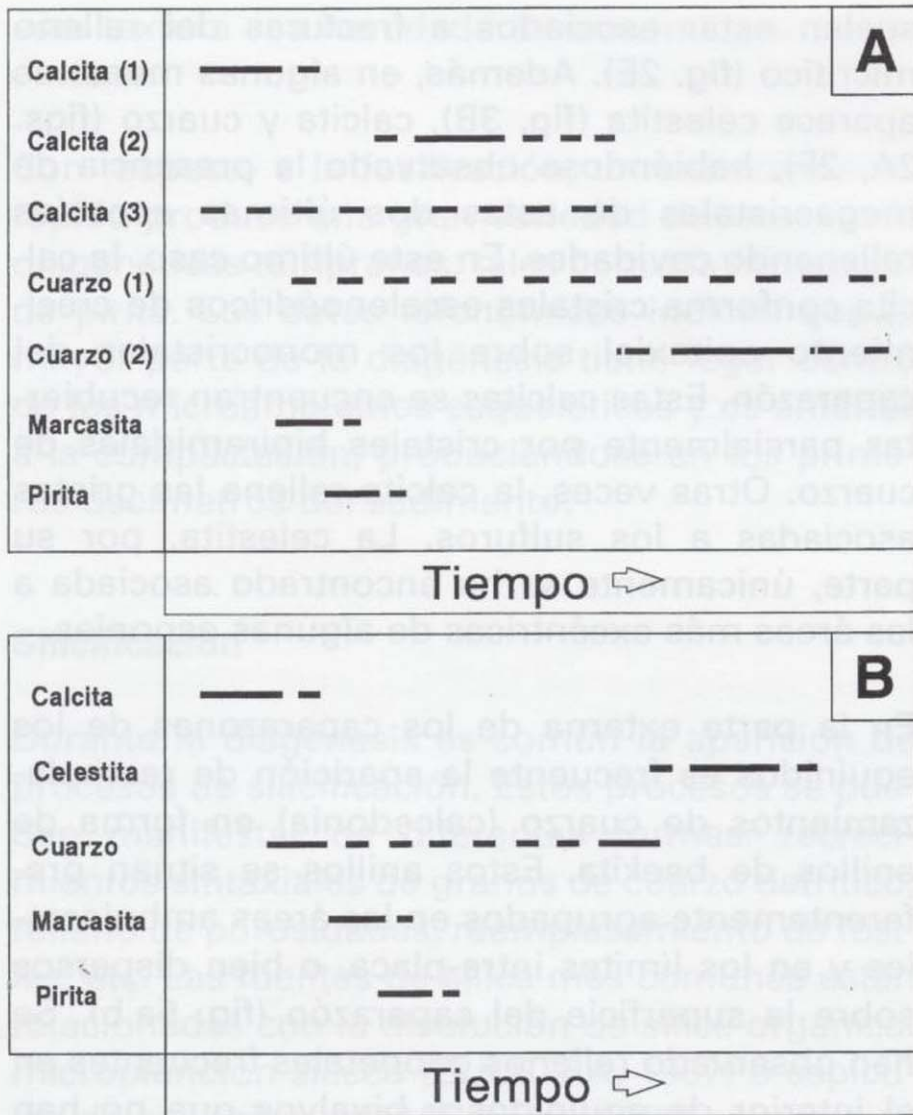


Fig. 4.- Secuencias de precipitación-reemplazamiento de la mineralización en los fósiles. A) Equínidos; B) Espongiarios.

sulfuros de Fe presentan un aspecto más homogéneo que el que se observa en otros fósiles (por ejemplo, espongiarios), en los que aparecen numerosas inclusiones de calcita o de calcedonia. Los sulfuros reemplazan parcialmente la concha de los bivalvos y, en menor medida, los monocristales de calcita del caparazón de los equínidos. Se ha observado la presencia de calcita con crecimiento epitaxial en continuidad óptica con estos monocristales y, con mayor frecuencia, rellenando fracturas o cavidades preexistentes (Lám. II, fig. 3).

En relación a la sílice, siempre aparece en forma de cuarzo, generalmente calcedonia (cuarcina/lutecita). La sílice se ha detectado en la mayoría de los fósiles observados. Se encuentra, por una parte, reemplazando a los monocristales de calcita típicos del caparazón de los equínidos (anillos de beekita) (Lám. I, fig. 3; Lám. II, figs. 1, 4); por otra parte, en el interior de equínidos y esponjas, el cuarzo aparece como agregados fibrosos que generan estructuras botroidales

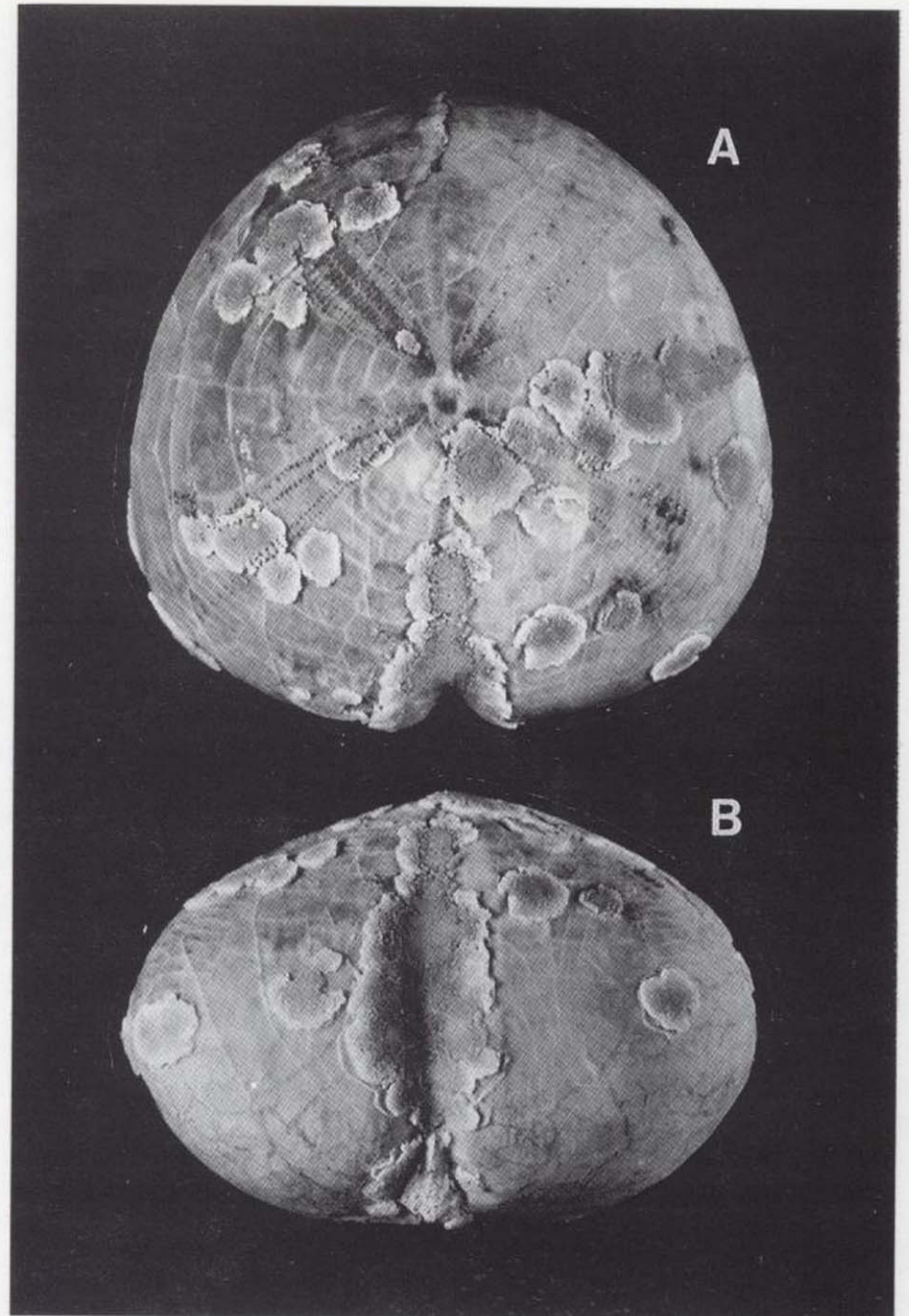
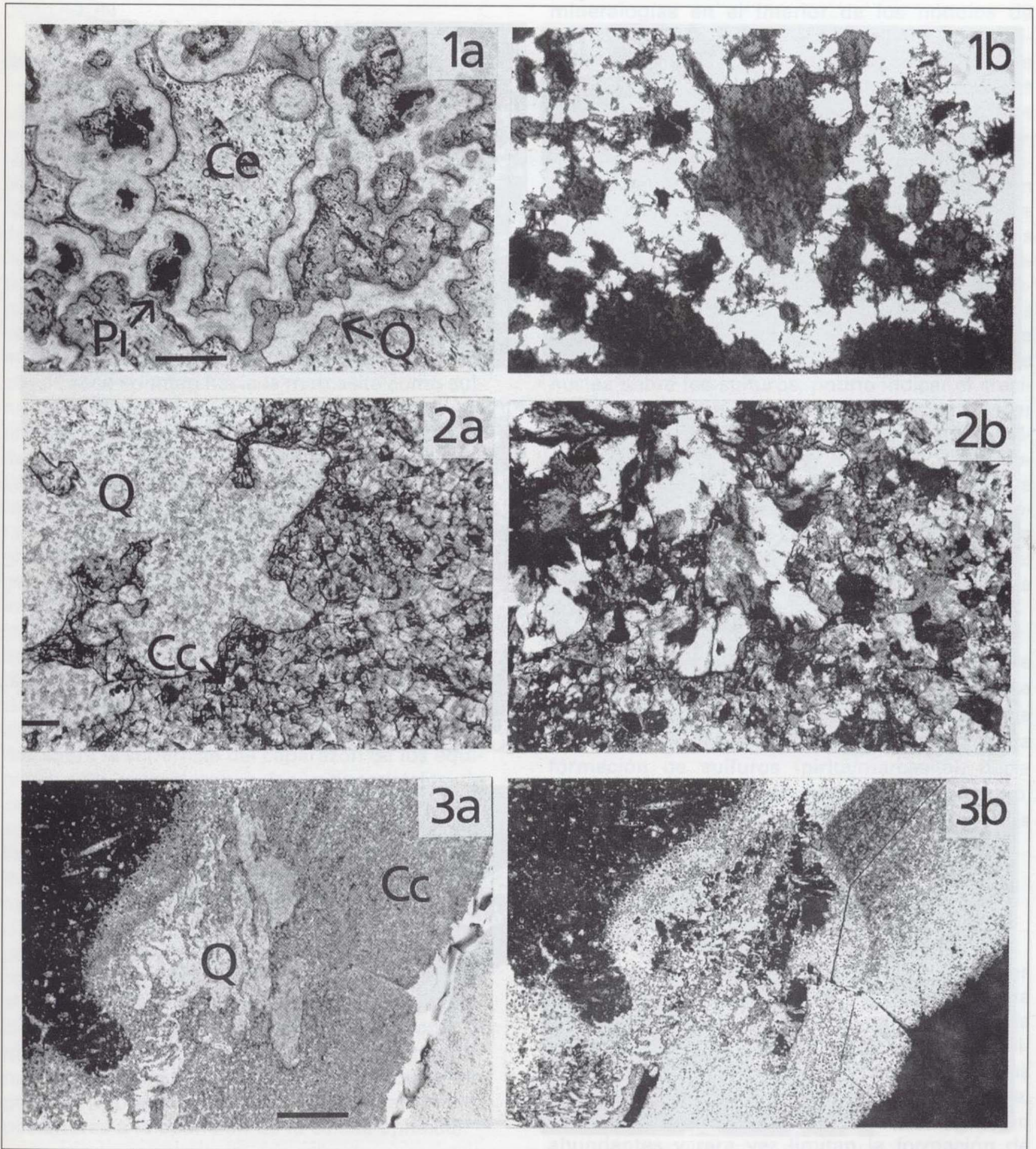


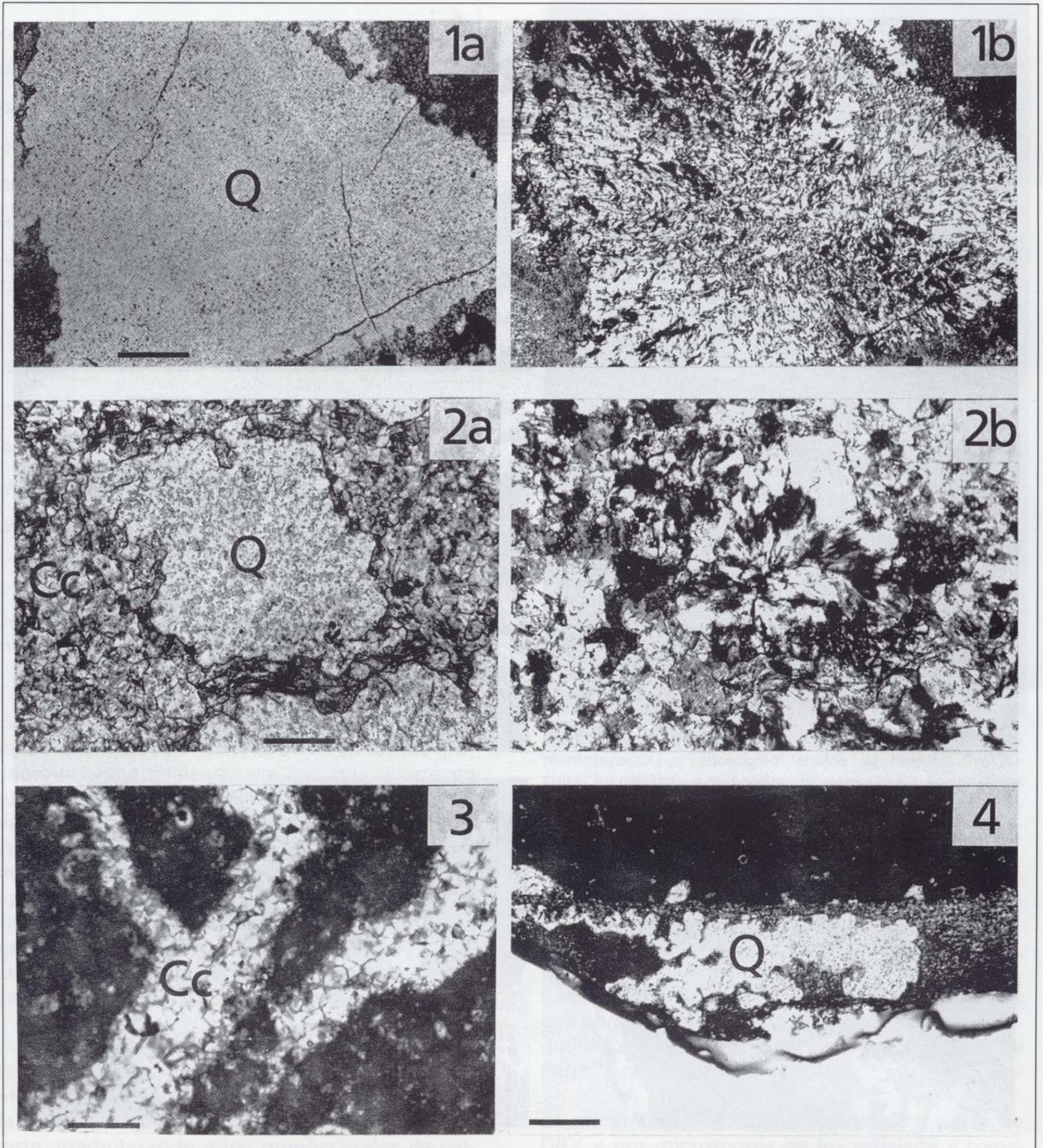
Fig. 5.- (1073/C) *Micraster* con el caparazón parcialmente reemplazado por calcedonia (anillos de beekita). Nótese como los anillos se disponen preferentemente en las áreas ambulacrales. El ejemplar ha sido tratado con HCl diluido, con el fin de disolver el caparazón y resaltar así la calcedonia. a) Vista aboral; b) Vista lateral. Ambas x1.

(Lám. I, fig. 1), o rosetas fibroso-radiadas (Lám. I, fig. 2; Lám. II, fig. 2). La celestita presenta dos texturas diferentes: a) cristales pseudoaciculares que engloban a la pirita y b) grandes cristales poiquilotópicos que rellenan los huecos existentes entre la calcedonia.

La mineralogía ha sido determinada a partir de DRX y por microscopía de luz reflejada y transmitida, observándose en muchos casos la coexistencia de las dos fases sulfuradas: marcasita y pirita. Por otra parte, estos análisis han revelado la existencia de trazas de yeso asociado al relleno de los equínidos.

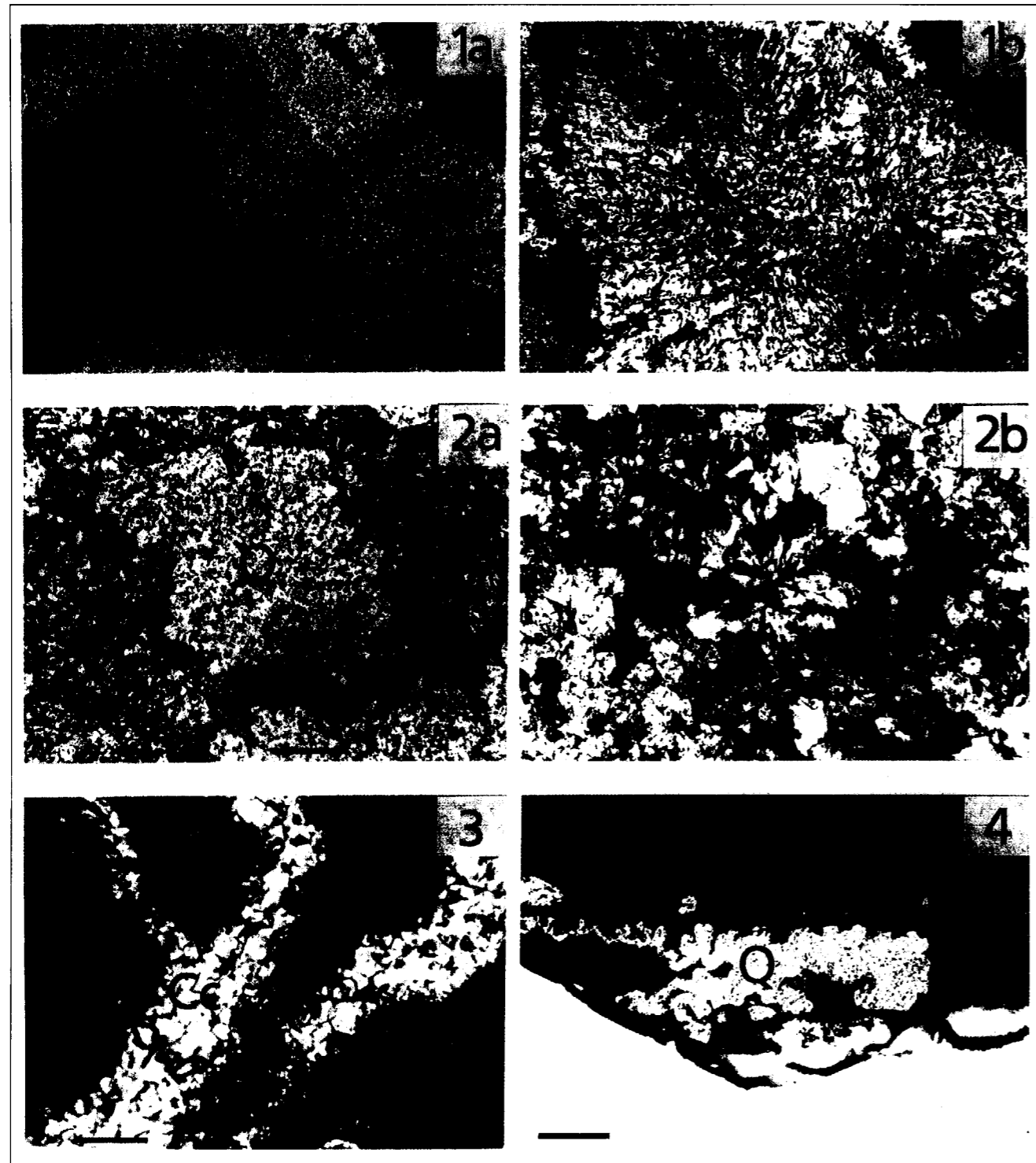


Lám. I.- 1) (1509/C) Cristal de celestita reemplazado parcialmente por calcedonia (cuarcina/lutecita) en espongiario. a) nícoles paralelos; b) nícoles cruzados. 2) (1072/C) Calcedonia (cuarcina/lutecita) reemplazando a un agregado de calcita en espongiario. a) nícoles paralelos; b) nícoles cruzados. 3) (1510/C) Sección tangencial de un anillo de beekita que reemplaza parcialmente los monocristales del caparazón de un *Echinocorys* sp. Nótese las espículas de espongiario reemplazadas por calcita en el relleno. a) nícoles paralelos; b) nícoles cruzados. Ce: celestita, Q: cuarzo, Pi: pirita, Cc: calcita. Barra de escala: 0.66 mm.



Lám. II.- 1) (1510/C) Sección transversal de un anillo de beekita que reemplaza parcialmente los monocristales del caparazón de un *Echinocorys*. a) nícoles paralelos; b) nícoles cruzados. 2) (1072/C) Calcedonia (cuarcina/lutecita) reemplazando a un agregado de calcita en un espongiario. a) nícoles paralelos; b) nícoles cruzados. 3) (1511/C) Venillas de calcita asociadas a fracturas en el relleno micrítico de un *Micraster*. 4) (1512/C) Sección longitudinal del caparazón de un *Micraster*. Nótese el reemplazamiento de la calcita por calcedonia. (cuarcina/lutecita). Q: cuarzo, Cc: calcita. Barra de escala: 0.66 mm.





Lám. II.- 1) (1510/C) Sección transversal de un anillo de beekita que reemplaza parcialmente los monocristales del caparazón de un *Echinocorys*. a) nicoles paralelos; b) nicoles cruzados. 2) (1072/C) Calcedonia (cuarcina/lutecita) reemplazando a un agregado de calcita en un espongiario. a) nicoles paralelos; b) nicoles cruzados. 3) (1511/C) Venillas de calcita asociadas a fracturas en el relleno micrítico de un *Micraster*. 4) (1512/C) Sección longitudinal del caparazón de un *Micraster*. Nótese el reemplazamiento de la calcita por calcedonia. (cuarcina/lutecita). Q: cuarzo, Cc: calcita. Barra de escala: 0.66 mm.

## DISCUSION

### Relaciones temporales de la mineralización

Los procesos de precipitación mineral en los espacios internos de equínidos, bivalvos y gasterópodos comienzan con la formación de calcita, bien cementando el relleno micrítico de estos fósiles, bien creciendo epitaxialmente en huecos del interior de las conchas. Después de la cementación comienza a producirse el reemplazamiento por marcasita/pirita de aquellas zonas del relleno más ricas en materia orgánica (fig. 4). Ambas especies sulfuradas coexisten dentro de los mismos nódulos, aunque los caracteres texturales observados apuntan hacia la marcasita como sulfuro precursor. El desarrollo de estos nódulos produce un aumento de volumen en el interior del fósil (sobre todo apreciable en los equínidos). Como consecuencia tiene lugar la fracturación, tanto del relleno cementado por la primera generación de calcita como de la concha del fósil. Las grietas generadas se rellenan por una segunda generación de calcita (fig. 4A). El crecimiento de los sulfuros se lleva a cabo con mucha facilidad si comienza en el relleno margoso rico en materia orgánica, mientras que en las estructuras formadas por calcita, este reemplazamiento es menor cuanto mayor es el tamaño de los cristales de calcita. Los anillos de beekita (calcedonia) encontrados sobre la superficie del caparazón de los equínidos sólo reemplazan a los monocristales de calcita (HOLDAWAY & CLAYTON, 1982), aunque su aparición en las áreas ambulacrales y en los límites entre placas (Lám. I, figs. 4a, b) parece indicar una nucleación preferente en las zonas más accesibles al fluido rico en sílice. Resulta difícil determinar la etapa de formación de esta calcedonia, ya que no aparece nunca en contacto con el resto de las fases de la mineralización. En el interior de los equínidos y salvo raras excepciones, la presencia de cuarzo (calcedonia y megacuarzo) es puntual. En el ejemplo anteriormente mencionado (fig. 2F) se han observado grandes monocristales de cuarzo claramente posteriores a la aparición de la calcita epitaxial.

Por otra parte, en los espongiarios (figs. 3A, 3C), los canales internos podrían haberse visto rellenos por calcita esparítica o calcedonia en fases previas a la formación de sulfuros. Este hecho condicionaría la preservación diferencial de estas

mineralogías en el interior de los nódulos de marcasita/pirita. Debido a su composición, originalmente silíceas, las mayores concentraciones de cuarzo se producen en los espongiarios. En estos fósiles se aprecian evidencias de crecimiento de calcedonia tanto anterior como posterior al crecimiento de los sulfuros (fig. 4B). La celestita constituye una de las fases minerales mayoritarias en el interior de algunos espongiarios, junto a la pirita y la calcedonia (cuarcina/lutecita). En estos ejemplares se generarían sulfuros muy tempranos, en el contexto de microambientes reductores, asociados generalmente a las cavidades centrales de los espongiarios. La presencia de una celestita fibrosa que aparentemente se nuclea sobre los sulfuros, podría indicar el crecimiento previo de un aragonito fibroso, posterior a la nucleación de la pirita. De este modo, la calcedonia crecería sobre el conjunto aragonito-pirita, dejando huecos que posteriormente se verían rellenos por celestita (cemento poiquilótópico). Probablemente, la formación de este cemento coincidiría con el reemplazamiento del aragonito fibroso, generándose así la celestita pseudoacicular observada (Lám. I, fig. 1)

La presencia de colonizaciones orgánicas sobre los anillos de beekita podría indicar una cierta removilización de los fósiles, que los trasladaría desde condiciones reductoras, favorables para la formación de sulfuros (pirita/marcasita), hacia condiciones con una mayor cantidad de oxígeno, más propicias para la formación de los sulfatos (celestina).

### Fuente de los elementos mineralizantes

La marcasita y la pirita constituyen las especies minerales más abundantes en el conjunto de la mineralización. Su génesis se relaciona con la existencia de microambientes reductores localizados en el interior de los fósiles y favorecidos por la descomposición de la materia orgánica. Los sulfatos disueltos en el agua del mar son abundantes y rara vez limitan la formación de pirita; además la mayoría de los fangos terrígenos también contienen suficiente hierro como para formar pirita o marcasita (BERNER, 1984). El S que entraría a formar parte de la estructura de los sulfuros procedería de la putrefacción de la

materia orgánica llevada a cabo por bacterias sulforreductoras.

Por otro lado, parece evidente que el origen de la sílice necesaria para la formación de las diferentes variedades de cuarzos estudiadas sea biogénico. Así, el reemplazamiento carbonático del ópalo A de las espículas de espongiarios, muy abundantes en el área de estudio, generaría la sílice libre necesaria para la formación del cuarzo.

La precipitación de sulfatos (yeso y celestita) en los espacios vacíos de los fósiles implica la existencia de microambientes con oxígeno. De este modo, el aporte de iones sulfato necesarios para la generación de celestita y yeso provendría del agua marina. Por otra parte la presencia de cantidades relativamente importantes de Sr podría estar relacionada con la desestabilización del aragonito que forma parte originalmente de algunas estructuras orgánicas, como los cálices de los corales (OLAUSSEN, 1981). En este caso podría tratarse de algún tipo de coral escleractinio (*Placosmilia* sp.) cuya presencia en la cuenca ha sido citada por VIERA (1983).

## CONCLUSIONES

- Los macrorrestos fósiles (equínidos, bivalvos, gasterópodos, espongiarios,...) que aparecen en las calizas arcillosas y margas del Cretácico Superior de Olazagutia presentan evidencias de mineralización (sulfatos, sulfuros, calcita y cuarzo).

- Los sulfuros (marcasita y pirita) tendrían un carácter temprano y se formarían en microambientes reductores, mientras que algún proceso de removilización permitiría la generación posterior de sulfatos en medios algo más oxidantes.

- El estudio de las relaciones texturales indica la presencia de varias generaciones de calcita. La calcita 1 es la que forma parte del relleno interno de las conchas, la calcita 2 aparece rellenando fracturas, y la calcita 3 conforma monocristales escalenoédricos.

- El cuarzo adquiere varias morfologías: reemplazando a los monocristales calcíticos de la concha

de los equínidos [rosetas de calcedonia (cuarcina/lutecita) en forma de anillos de beekita], agregados botroidales de calcedonia en el interior de los fósiles o bien grandes monocristales bipiramidales en el interior de cavidades encontradas en los equínidos como respuesta a un descenso en la concentración de la sílice.

- Los sulfatos provendrían del agua del mar, mientras que el Sr se liberaría de la estructura del aragonito que forma originalmente estructuras biogénicas.

- El Fe necesario para la formación de los sulfuros provendría de los fangos terrígenos, mientras que el S aparecería como consecuencia de los procesos de putrefacción de la materia orgánica (bacterias sulforreductoras).

- La presencia de espículas de esponja de composición opalina reemplazadas por calcita indicaría el origen biogénico de la sílice.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Tres Cantos (ITGE) la realización de las láminas delgadas, así como las Difracciones de Rayos X.

El acceso a la cantera de margas de la Empresa Cementos Portland fue facilitado por el Sr. Emilio Río Rodríguez.

Quisiéramos agradecer también los comentarios críticos de Alfonso Arribas, Santiago Falces y Carlos Rossi, así como mencionar la colaboración de Manuel Regueiro en los contactos previos a la campaña de campo.

La revisión crítica del manuscrito ha sido realizada por el Dr. Javier Elorza (Universidad del País Vasco), a quien agradecemos el interés demostrado y sus valiosos comentarios y sugerencias.

## REFERENCIAS

- AMIOT, M. (1982). El Cretácico superior de la Región Navarro-Cántabra. In: *El Cretácico de España*, 88-111. Universidad Complutense.
- ASTIN, T.R. (1987). Petrology (including fluorescence microscopy) of cherts from the Portlandian of Wiltshire, U.K.-

Evidence of an episode of meteoric water circulation, in: *Diagenesis of Sedimentary Sequences* (J.D. Marshall, ed.) *Geological Society London. Special Publications*, 36: 73-85.

BERNER, R.A. (1984). Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 855-862.

BRETT, C.E. & BAIRD, G.C. (1986). Comparative taphonomy: A key to paleoenvironmental interpretation based on fossil preservation. *Palaos*, 1: 207-227.

CANFIELD, D.E. & RAISWELL, R. (1991). *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. Vol. 9 of Topics in Geobiology. Eds. P.A. Allison & D.E.G. Briggs, Plenum Press, New York.

CARSON, G.A. (1991). *Taphonomy: Releasing the Data Locked in the Fossil Record*. Vol.9 of Topics in Geobiology. Eds. P.A. Allison & D.E.G. Briggs, Plenum Press, New York.

CLAYTON, C.J. (1982). Growth history and microstructure of flint. In: *Abstracts. International Association of Sedimentologists, 3rd European Meeting, Copenhagen*, 105-107.

ELEY, B.E. & JULL, R.K. (1982). Chert in the middle Silurian Fossil Hill Formation of Mantitoulin Island, Ontario. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 30: 208-215.

ELORZA, J. & RODRIGUEZ-LAZARO, J. (1984a). Late cretaceous quartz geodes after anhydrite from Burgos, Spain. *Geological Magazine*, 121: 107-113.

ELORZA, J. & RODRIGUEZ-LAZARO, J. (1984b). Existencia de estructuras nodulosas de celestina afectadas por silicificación en el Valle de Losa (N de Burgos) *Estudios Geológicos*, 40: 41-48.

ELORZA, J. & RODRIGUEZ-LAZARO, J. (1987). Quartz geodes with celestite and calcite after anhydrite from Langre (Santander, Spain). In *Proceedings of the International Meeting "Geochemistry of the Earth Surface and Processes of Mineral Formation"*, Granada (Eds. R. Rodríguez-Clemente and Y. Tardy): 837-847.

FOLK, R.L. & PITTMAN, J.S. (1971). Length slow chalcedony: A new testament for vanished evaporites. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41: 1045-1058.

GAO, G. & LAND, L.S. (1991). Nodular chert from the Arbuckle Group. Slick Hills, SW Oklahoma: a combined field, petrographic and isotopic study. *Sedimentology*, 38: 857-870.

GEESLIN, J.H. & CHAFETZ, H.S. (1982). Ordovician Aleman ribbon cherts: An example of silicification prior to carbonate lithification. *Journal Sedimentary Petrology*, 52: 1283-1293.

GALLEMI, J., KUECHLER, T., LAMOLDA, M., LOPEZ, G., MARTINEZ, R., MUÑOZ, J., PONS, J.M. y SOLER, M. (1997). The Coniacian-Santonian boundary in Northern Spain: the Olazagutia Section. *Mineralia Slovaca*, 29: 311.

HEDGES, E.S. (1932). *Liesegang Rings and Other Periodic Structures*. London: Chapman & Hall.

HOLDAWAY, H.K. & CLAYTON, C.J. (1982). Preservation of shell microstructure in silicified brachiopods from the Upper Cretaceous Wilmington sands of Devon. *Geological Magazine*, 119: 371-382.

HUDSON, J.D. (1982). Pyrite in ammonite-bearing shales from the Jurassic of England and Germany. *Sedimentology*, 29: 639-667.

HUGHS, T. (1889). On the manner of occurrence of beekite and its bearing upon the origin of siliceous beds of Paleozoic age. *Mineralogical Magazine*, 8: 265-271.

IJIMA, A. & TAFI, R. (1981). Silica diagenesis of Neogene diatomaceous and volcanoclastic sediments in northern Japan. *Sedimentology*, 28: 185-200.

JARVIS, I., GALE, A.S., and CLAYTON, C. (1982). Litho and biostratigraphical observations on the type sections of the Craie de Villedieu Formation (Upper Cretaceous, western France). *Newsletters Stratigraphy*, 11: 64-82.

KASTNER, M. (1981). Authigenic silicates in deep-sea sediments: Formation and diagenesis, in *The Sea*, Volum. 7, *The Oceanic Lithosphere* (C. Emiliani, ed.), Wiley, New York, pp. 915-980.

LEO R.F. & BARGHOORN, E.S. (1976). Silicification of wood. *Leaflets Harvard University*, 25: 1-47.

OLAUSSEN, S. (1981). Formation of celestite in the Wenlock, Oslo Region Norway. Evidence for evaporitic depositional environments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 51 (1): 37-46.

RAISWELL, R. & BERNER, R.A. (1985). Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediment. *American Journal of Science*, 285: 710-724.

RAMIREZ DEL POZO, J. (Coord.). (1978). Memoria del Mapa Geológico de España nº 113 (Salvatierra). Escala 1:50.000. Instituto Geológico y Minero de España.

SANTAMARIA, R. y LOPEZ, G. (1996). Aspectos bioestratigráficos de los ammonites e inocerámidos (Bivalvia) del Albiense superior al Maastrichtiense de la provincia de Alava. *Revista Española de Paleontología*, Nº Extraordinario, 148-159.

THIRY, M., BERTRAND AYRAULT, M. and GRISONI, J.C. (1988). Ground-water silicification and leaching in sands: Example of the Fontainebleau Sand (Oligocene) in the Paris Basin. *Bulletin Geological Association of America*, 100: 1283-1290.

VIERA, L.I. (1983). Notas bioestratigráficas sobre una comunidad de equínidos en el Cretáceo superior de San Martín (Amescoa Baja, Navarra). *MUNIBE*, 35. 1-2: 29-34.

ZIJLTRA, H.J.P. (1987). Early diagenetic silica precipitation in relation to redox boundaries and bacterial metabolism, in late Cretaceous of the Maastrichtian type locality. *Geologie en Mijnbouw*, 66: 343-355.

Original recibido: Enero 1998.

Original aceptado: Marzo 1998.

# CORRELACION AUTOMATICA DE SONDEOS MEDIANTE DIAGRAFIAS EN EL SUR DE LA CUENCA DEL DUERO

Por J. M. DIAZ CUIEL (\*), M.<sup>a</sup> J. MIGUEL (\*\*), S. DOMINGUEZ (\*\*\*) y N. CAPARRINI (\*\*\*\*)

## RESUMEN

En esta comunicación presentamos una metodología desarrollada para la correlación de sondeos empleando los registros continuos de parámetros físicos (diagrafas) efectuados en su interior, demostrando su importancia en la interpretación geológica e hidrogeológica de cuencas detríticas continentales.

Los métodos seleccionados para la obtención automática de la citada correlación, son la técnica matricial de *cross-association* entre las columnas litológicas (resultantes de la interpretación de las diagrafas) de sondeos próximos, y la *cross-correlation*, también en comparación matricial, entre los tramos geofísicos de sondeos lejanos. Ambos métodos se han modificado para obtener resultados óptimos en su utilización sobre diagrafas.

Con esta metodología se ha elaborado un sistema automático de correlación, en la que se contemplan, de forma conjunta, la información resultante de la comparación de las columnas litológicas, los niveles guía y los tramos geofísicos definidos en cada sondeo.

Este sistema se ha utilizado sobre una serie de sondeos ubicados en el sur de la cuenca del Duero, como ejemplo de cuenca detrítica multicapa, tan abundantes en el Neógeno y Cuaternario peninsular.

Se muestran los resultados alcanzados en los procesos de correlación entre esos sondeos, obteniendo una curva de correlación con la distancia. Con ello, se pretende evaluar las posibilidades de correlacionar a grandes distancias, mediante registros geofísicos, alcanzando al mismo tiempo, un mayor conocimiento de la cuenca elegida en este estudio.

*Palabras clave:* Correlación, Diagrafía, Cálculo automático, *Cross-Association*, *Cross-Correlation*, Capas Guía, Cuenca del Duero.

## ABSTRACT

In this paper we present the methodology developed to correlate boreholes using well logs, in order to demonstrate the relevance of this correlation in the geological knowledge of continental detrital basins.

The selected methods to obtain automated correlation are the cross-association technique between lithologic columns (deduced from well logs) of nearby holes, and the cross-correlation, also in matrix form comparison, between zones of distant holes. Both methods have been modified in order to obtain optimum results in the correlation of well logs.

With this methodology we have established an automated correlation system that involves, as a whole, the results of the comparison of lithologic columns, the marker beds and the zones interpreted in each hole.

This system has been applied over a set of water wells located in the southern area of Duero basin (Spain), demonstrating through the analysis of results, its interest in the geological and hydrogeological interpretation, total or partial, of a multilayered detrital basin, so profuse in the Neogene and Quaternary of the Iberian Peninsula.

Finally, we show the results obtained from the correlation processes between this open holes by means of a curve of correlation versus distance. In this sense, we have tried to evaluate the possibility of great distances correlations, using well logs, reaching at the same time, a greater knowledge of the studied basin in this work.

*Key words:* Correlation, Well logs, Automatic processing, *Cross-Association*, *Cross-Correlation*, Marker beds, Duero Basin (Spain).

(\*) Profesor Titular. E.T.S.I. de Minas, Universidad Politécnica de Madrid.

(\*\*) Ingeniero de Minas. Empresa Nacional de Ingeniería y Tecnología (INITEC).

(\*\*\*) Licenciado en Ciencias Geológicas. Estudio y Control de Materiales S.A.

(\*\*\*\*) Licenciada en Ciencias Geológicas. E.T.S.I. de Minas de Madrid.

## 1 INTRODUCCION

Correlacionar en Testificación Geofísica es mostrar una correspondencia en carácter, secuencia y posición entre los distintos fragmentos de dos diagrfías. Dicha correlación tiene, desde el momento que pueda implicar una continuidad lateral de ciertas propiedades físicas, connotaciones eminentemente prácticas.

El paso entre la correlación geofísica y la correlación geológica tiene, lógicamente, una serie de ventajas añadidas. Aunque la correlación geofísica contempla aspectos de índole netamente geológicos (concordancia de la asignación litológica de las diagrfías entre los fragmentos correlacionados), este paso es un proceso añadido que incluye conceptos como la pertenencia a una misma unidad litoestratigráfica, la correlación crono-estratigráfica o el establecimiento de secuencias deposicionales.

Aunque ciertas herramientas matemáticas, como son el estudio de cadenas markovianas, pueden proporcionar información más allá de lo esperado desde un punto de vista geológico, la correlación geológica incluye algunos criterios que sólo pueden contemplarse a nivel automático desde la óptica de sistemas expertos (MULHOLLAND, 1994; OLEA, 1994). Dichos sistemas expertos requieren tomar decisiones, por parte del usuario, basadas en conocimientos profundos sobre la geología del medio estudiado. Por esta razón, pensamos que la mejor manera de alcanzar una correlación definitiva es partir de una correlación geofísica, lo más completa posible, posteriormente profundizar en la información crono y litoestratigráfica de la zona y por último, tratar de incluir, en un sistema experto, las reglas que dicho conocimiento implica.

En este artículo, se presenta pues, la metodología para realizar el primero de estos tres procesos, al mismo tiempo que se describe la forma para su implementación en programas informáticos, lo cuál, además de la dificultad que entraña el paso entre ciertos métodos teóricos y su aplicación real sobre registros geofísicos, son aspectos que, seguramente por razones económicas, no siempre son divulgados ("Geologicx": RIEUWERTS, 1989).

A nivel físico-matemático, el carácter que se uti-

liza en las correlaciones geofísicas puede ser su valor paramétrico (igualdad de resistividad, de emisión gamma,...etc), la forma de los distintos registros (*cross-correlation*, reconocimiento de patrones, ...etc) o los códigos establecidos en las asignaciones litológicas resultantes de la interpretación de las diagrfías (columna geofísica).

Hasta la fecha, y como práctica más común, es posible y tiene sentido realizar correlaciones "capa a capa" para sondeos próximos o entre capas "guía" para sondeos distantes. Sin embargo, en cuencas detríticas multicapa (uno de los medios sedimentarios más frecuentes en el Neógeno y Cuaternario peninsular) y de cara a realizar macro-correlaciones entre sondeos lejanos que permitan dar un enfoque geológico e hidrogeológico regional, este tipo de correlaciones adolecen de extensión espacial.

Es por este motivo, por el que la división de las diagrfías en tramos, series o zonas, además de la importancia propia para caracterización intrínseca de los sondeos (subdividir el sondeo en grupos de comportamiento físico diferenciado), adquiere una mayor relevancia y se plantea como el método más eficaz para encontrar correlaciones entre sondeos lejanos dentro de una cuenca como la estudiada.

La correlación de dichos tramos o zonas (término empleado en la bibliografía anglo-sajona) tiene una gran importancia en el estudio hidrogeológico y la gestión de los recursos hídricos de una cuenca, así como en la información que representa para la ubicación y planificación de sondeos en una región hidrogeológica determinada (DIAZ CURIEL et al, 1995).

En la Tesis Doctoral de DIAZ CURIEL (1996) se desarrolla la metodología para realizar tanto la segmentación de diagrfías (obtención de las capas atravesadas por un sondeo), como la correspondiente asignación litológica de dichos niveles, y la zonación o tramificación de los registros, todos ellos procesos necesarios para realizar, de forma automática, la posterior correlación. Estas metodologías se presentan en publicaciones complementarias.

Entre los objetivos del presente artículo, están el lograr un mayor aprovechamiento de los datos

aportados por la testificación geofísica de sondeos (incluso manteniendo el empleo de equipos de coste relativamente bajo), así como divulgar la utilización de éstas técnicas, tan escasa en nuestro país, en sondeos, sea cuál sea la finalidad para la que éstos se realicen.

## 2 SONDEOS SELECCIONADOS

Los sondeos utilizados para este estudio forman parte de la campaña realizada para el abastecimiento de aguas de riego en Castilla y León, entre el I.R.Y.D.A. y la Dirección General de Estructuras Agrarias de dicha comunidad. La Cátedra de Geofísica aplicada de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid ha sido la encargada de efectuar la Testificación de buena parte de esos sondeos.

De las más de 60 diagrfías realizadas por algunos de los autores a lo largo de toda la cuenca, se han seleccionado un total de 27, tanto por su

localización geográfica (una distribución geográfica apropiada para establecer un perfil de correlación) como por alcanzar una profundidad elevada (superior a los 400 metros). En la Figura 1 aparece un croquis de situación de los sondeos seleccionados.

En este plano se ha trazado un perfil Noroeste-Sureste para realizar posteriormente una sección de correlación. Como puede observarse, los sondeos seleccionados presentan al Noroeste una fuerte agrupación que va dispersándose hacia el Este en forma de abanico, lo que nos permitirá realizar una evaluación detallada del alcance de la correlación.

Los parámetros registrados han sido radiación gamma natural (G.N.), potencial espontáneo (P.E.), resistividades normales (R.N.C. para AM=0.4 y R.N.L. para AM=1.6 m), resistencia monoelectrónica (R.M.E.), resistividad lateral (RLAT con AO=1.8 m) y, en algunos de ellos, temperatura (T).

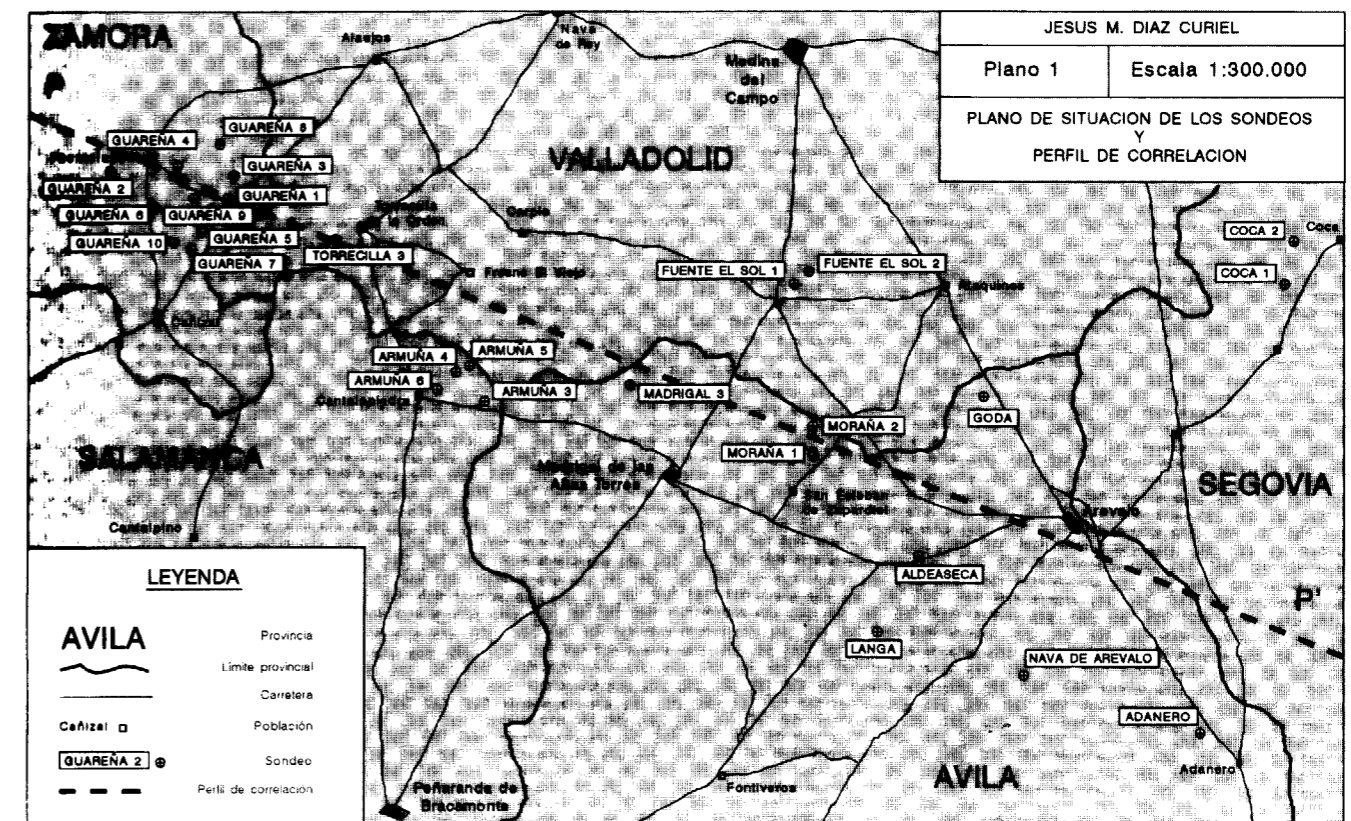


Figura 1 – Plano de situación de los sondeos

aportados por la testificación geofísica de sondeos (incluso manteniendo el empleo de equipos de coste relativamente bajo), así como divulgar la utilización de éstas técnicas, tan escasa en nuestro país, en sondeos, sea cuál sea la finalidad para la que éstos se realicen.

## 2 SONDEOS SELECCIONADOS

Los sondeos utilizados para este estudio forman parte de la campaña realizada para el abastecimiento de aguas de riego en Castilla y León, entre el I.R.Y.D.A. y la Dirección General de Estructuras Agrarias de dicha comunidad. La Cátedra de Geofísica aplicada de la E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid ha sido la encargada de efectuar la Testificación de buena parte de esos sondeos.

De las más de 60 diagrfías realizadas por algunos de los autores a lo largo de toda la cuenca, se han seleccionado un total de 27, tanto por su

localización geográfica (una distribución geográfica apropiada para establecer un perfil de correlación) como por alcanzar una profundidad elevada (superior a los 400 metros). En la Figura 1 aparece un croquis de situación de los sondeos seleccionados.

En este plano se ha trazado un perfil Noroeste-Sureste para realizar posteriormente una sección de correlación. Como puede observarse, los sondeos seleccionados presentan al Noroeste una fuerte agrupación que va dispersándose hacia el Este en forma de abanico, lo que nos permitirá realizar una evaluación detallada del alcance de la correlación.

Los parámetros registrados han sido radiación gamma natural (G.N.), potencial espontáneo (P.E.), resistividades normales (R.N.C. para AM=0.4 y R.N.L. para AM=1.6 m), resistencia monoelectrónica (R.M.E.), resistividad lateral (RLAT con AO=1.8 m) y, en algunos de ellos, temperatura (T).

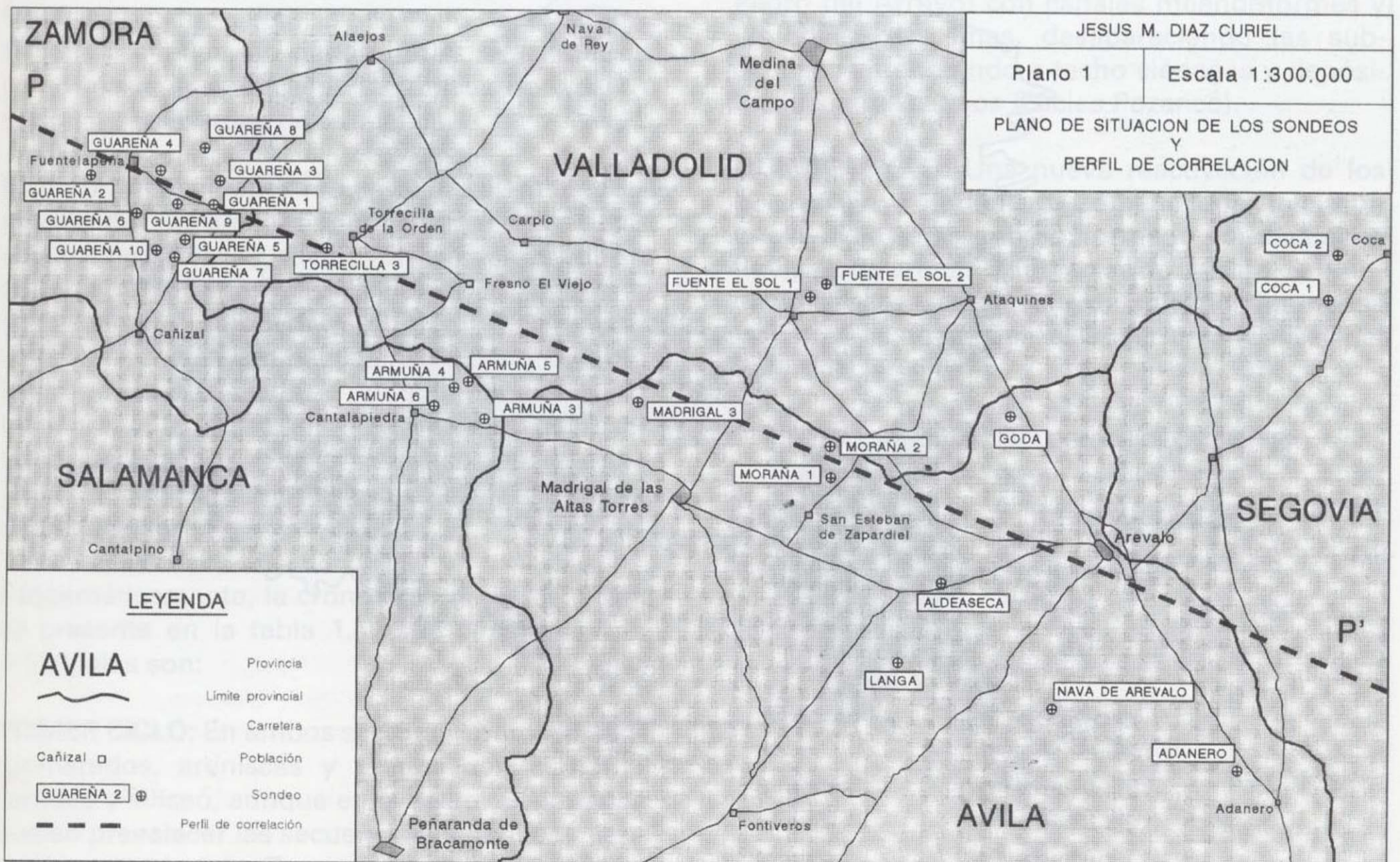


Figura 1 – Plano de situación de los sondeos

La mayoría de los sondeos se perforaron mediante rotación con circulación inversa de lodos, aunque algunos se realizaron con circulación directa. Para la ejecución de dichos sondeos se emplearon lodos de distintos tipos: Orgánicos (Revert), bentoníticos y naturales con conductividades comprendidas entre 860 y 2260  $\mu\text{mho/cm}$ .

Para un mayor control de los resultados geofísicos, se realizaron los levantamientos de columnas litológicas a partir del detrito de perforación sobre los que, en seis de los sondeos estudiados, se obtuvieron las curvas granulométricas.

Desde un punto de vista geofísico, y con los parámetros medidos, podemos distinguir las siguientes litologías: Gravas, arenas, limos, arcillas y términos mixtos entre éstas; lógicamente estas "litologías geofísicas" no se corresponden exactamente con sus homónimos geológicos.

También se han diferenciado, con la ayuda de las columnas litológicas, los niveles de margas y sus correspondientes litologías mixtas (arenas margosas,...).

### 3 MARCO GEOLOGICO

La depresión del Duero está enclavada sobre el Macizo Hespérico, originándose a finales del Cretácico o principios del Paleoceno como consecuencia de la removilización alpina de fracturas tardihercínicas. Está enmarcada por sistemas montañosos de entidad geográfica y litológica muy distintas (plutónicas, metamórficas, siliciclásticas, carbonatadas, ...). Esta gran variedad litológica actúa como roca madre de los materiales del relleno que conforman la cuenca, los cuales, aunque al Noreste alcanzan espesores de hasta 3000 m., presentan en nuestra zona de estudio, un espesor medio de 500 m. (figura 2,

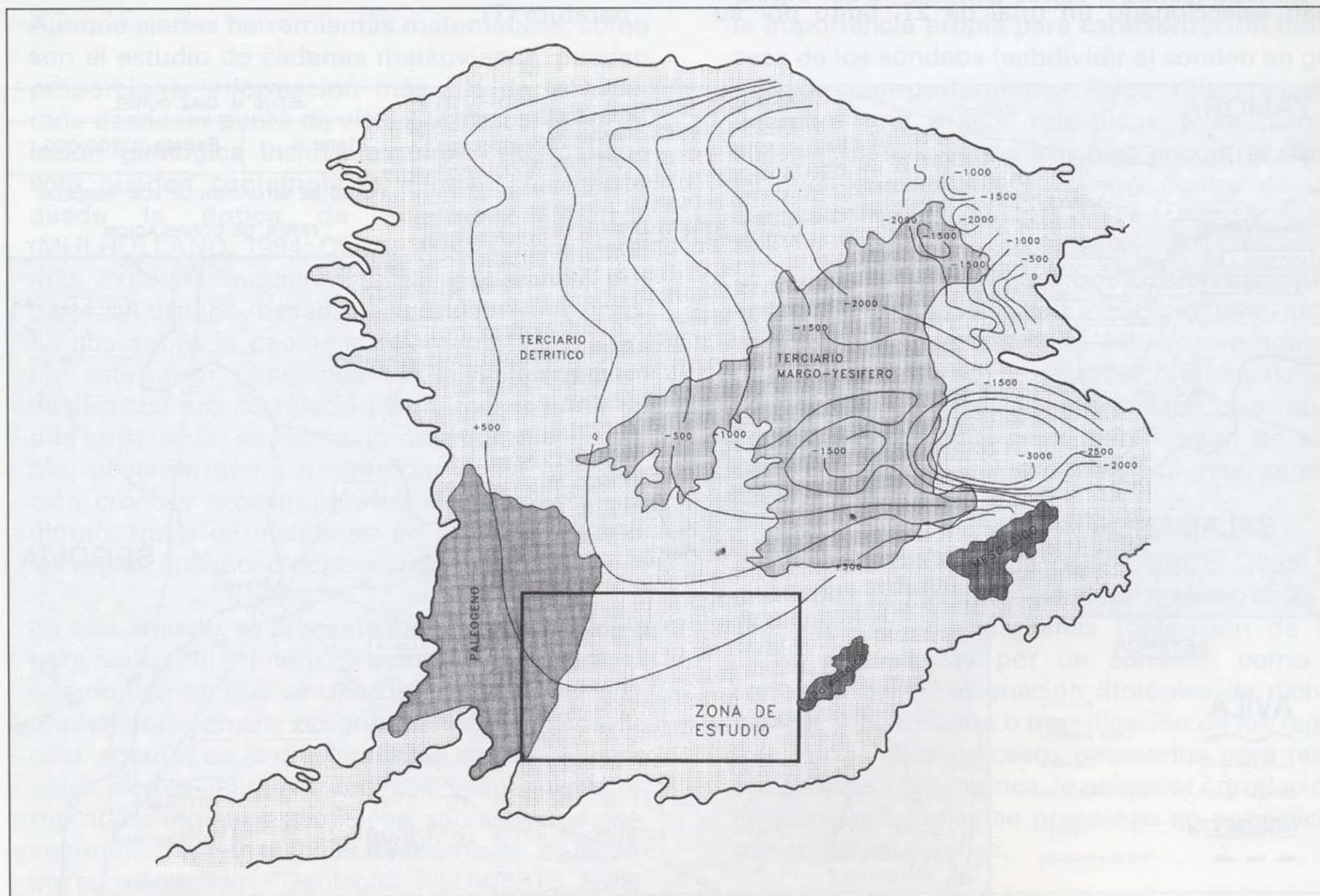


Figura 2 – Situación de la zona de estudio en la Cuenca del Duero

La mayoría de los sondeos se perforaron mediante rotación con circulación inversa de lodos, aunque algunos se realizaron con circulación directa. Para la ejecución de dichos sondeos se emplearon lodos de distintos tipos: Orgánicos (Revert), bentoníticos y naturales con conductividades comprendidas entre 860 y 2260  $\mu\text{mho/cm}$ .

Para un mayor control de los resultados geofísicos, se realizaron los levantamientos de columnas litológicas a partir del detrito de perforación sobre los que, en seis de los sondeos estudiados, se obtuvieron las curvas granulométricas.

Desde un punto de vista geofísico, y con los parámetros medidos, podemos distinguir las siguientes litologías: Gravas, arenas, limos, arcillas y términos mixtos entre éstas; lógicamente estas "litologías geofísicas" no se corresponden exactamente con sus homónimos geológicos.

También se han diferenciado, con la ayuda de las columnas litológicas, los niveles de margas y sus correspondientes litologías mixtas (arenas margosas,...).

### 3 MARCO GEOLOGICO

La depresión del Duero está enclavada sobre el Macizo Hespérico, originándose a finales del Cretácico o principios del Paleoceno como consecuencia de la removilización alpina de fracturas tardihercínicas. Está enmarcada por sistemas montañosos de entidad geográfica y litológica muy distintas (plutónicas, metamórficas, siliciclásticas, carbonatadas, ...). Esta gran variedad litológica actúa como roca madre de los materiales del relleno que conforman la cuenca, los cuales, aunque al Noreste alcanzan espesores de hasta 3000 m., presentan en nuestra zona de estudio, un espesor medio de 500 m. (figura 2,

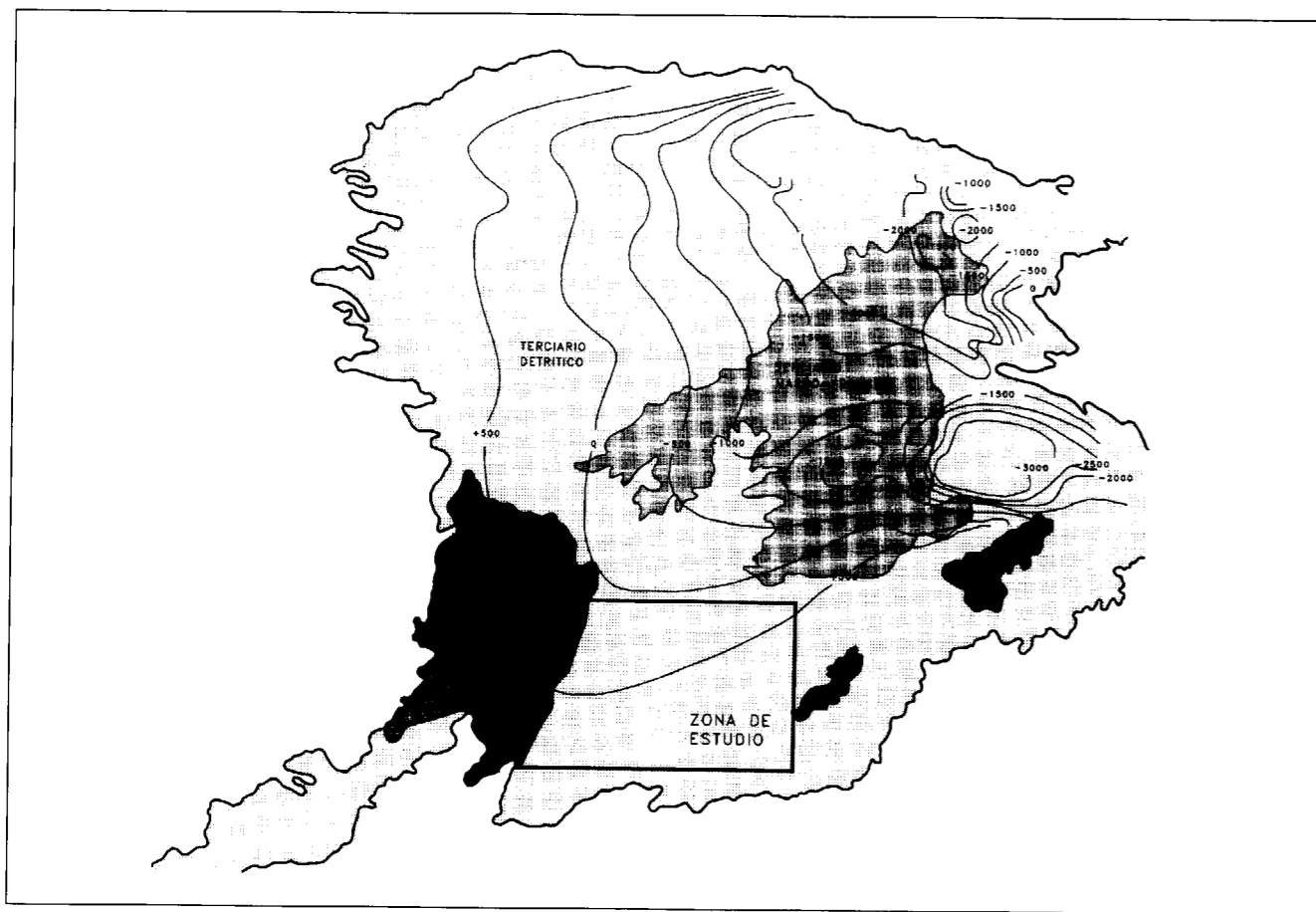


Figura 2 – Situación de la zona de estudio en la Cuenca del Duero

sobre gráfico de isobatas en el Terciario detrítico del I.T.G.E., 1980). Litológicamente dicha zona se caracteriza por la escasez de términos químicos hasta las profundidades alcanzadas en los sondeos analizados.

De cara a introducir el alcance geológico que puedan tener los resultados obtenidos a través de la correlación geofísica, se ha realizado una recopilación bibliográfica, basados fundamentalmente en datos de superficie, en la que encontramos una fuerte subdivisión de la cuenca en unidades, formaciones o facies no muy diferenciadas entre sí. De esta recopilación, y dentro de nuestra zona de estudio, hemos intentado extraer los aspectos más comunes a escala horizontal y, a su vez, más diferenciadores a escala vertical, resultando ser los aspectos de naturaleza tecto-estratigráfica.

A grandes rasgos, se pueden abstraer de los estudios publicados concernientes a la zona de estudio (ITGE, 1980; JIMENEZ et al, 1983; PORTERO et al, 1983; MEDIAVILLA et al, 1988; ROLANDI, 1989; ...etc.), cinco ciclos sedimentarios en la cuenca, en general muy relacionados con otros tantos procesos tectónicos por reactivación de los bordes de la cuenca.

En las primeras etapas resultaba frecuente la formación de subcuencas independientes, separadas por umbrales, y cuya evolución se producía algo diferente entre sí; más adelante y hasta la actualidad se homogeneiza el entorno, actuando como una única gran cuenca. De hecho, durante los tres primeros ciclos se puede reconocer en la bibliografía, la existencia de, al menos, dos sectores reconocidos (Sector Salamanca y Sector Zamora) con características estratigráficas bien diferenciadas.

Esquemáticamente, la cronología de estos ciclos se presenta en la tabla 1, y sus características principales son:

**PRIMER CICLO:** En ambos sectores aparecen conglomerados, arenas y fangos con cemento ferrítico y silíceo, aunque en el sector Salamanca suelen prevalecer las secuencias negativas mientras que en el sector Zamora resultan, en general, positivas.

**SEGUNDO CICLO:** Los aportes van perdiendo energía por la progresiva colmatación de la cuenca, llegándose a instalar ambientes de lagunas efímeras en los que se depositan margas y calizas. Dentro del clima intertropical, existen períodos de aridez, con desarrollo de costras calcáreas. En el sector Salamanca aparecen las Areniscas de Cabrerizos, mientras que en el sector Zamora son más frecuentes, junto a las areniscas, limolitas, arcillas, margas y calizas.

**TERCER CICLO:** Se inicia con una nueva reactivación y su desarrollo y evolución resultan muy similares al Ciclo anterior, con arenas y limos de la Formación Aldearrubia en el sector Salamanca y gravas, areniscas y limos en el sector Zamora.

**CUARTO CICLO:** Desaparecen las subcuencas y se genera el Sistema Central, provocando series positivas que terminan con la sedimentación de facies lacustres (calizas del Páramo inferior). En el borde Sur se depositan materiales arcósicos por la influencia del área madre granítica. Predominan las facies distales (facies de San Pedro del Arroyo) con canales meandriiformes y litologías más finas, desapareciendo las subcuencas y generando a techo ciénagas y depósitos lacustres salinos (Facies Pozanco).

**QUINTO CICLO:** Una nueva reactivación de los bordes (Fase Rodénia-Iberomanchega) inicia un nuevo ciclo sedimentario, formado por depósitos fluviales de arenas y subfacies de llanura de inundación sobre las que se instalan facies margosas lacustres hasta las Calizas superiores (Calizas del Páramo).

Tabla 1- CICLOS GEOLOGICOS DEL TERCARIO

	CRONOLOGIA	
QUINTO CICLO	MIOCENO SUPERIOR - PLIOCENO	NEOGENO
CUARTO CICLO	OLIGOCENO SUPERIOR - MIOCENO SUPERIOR	
TERCER CICLO	EOCENO MEDIO - OLIGOCENO SUPERIOR	PALEOGENO
SEGUNDO CICLO	EOCENO INFERIOR - EOCENO MEDIO	
PRIMER CICLO	PALEOCENO - EOCENO INFERIOR	

Estas características geológicas, junto con la situación de la zona de estudio, representan una serie de condiciones apropiadas para una correcta contrastación de los resultados:

- Está suficientemente alejada de los bordes como para asegurar la existencia de gran variabilidad de litologías y potencia de niveles, tendencia a la horizontalidad de capas, espesor de sedimentos elevado, etc.
- Está adecuadamente distante del centro de la cuenca como para permitir una relativa homogeneidad de los procesos de sedimentación que nos asegure cierta continuidad en el espacio.

No obstante, tanto la longitud como la situación el perfil elegido (figura 1), conllevan consideraciones de carácter geológico que actúan como fuente de incertidumbre y ambigüedad interpretativa:

- Dada la relativa proximidad de sus extremos (NO y SE) a dos bordes de cuenca distintos (SO y S), nos encontramos con áreas fuente distintas, con diferentes sedimentos y fases de reactivación, complicando la correlación.
- La cercanía de su zona central al propio de la cuenca puede presentar un carácter transicional a facies químicas de difícil correlación con el resto.

#### 4 METODOS DE CORRELACION

En la bibliografía especializada se han sucedido, durante las tres últimas décadas, una serie de algoritmos físico-matemáticos para la correlación de diagrfías, entre los que cabe destacar:

##### Cross-Correlation

La función de *cross-correlation* entre dos curvas,  $f(x)*g(x)$ , se define como la convolución de una de ellas por el opuesto de la otra. Esta operación matemática viene definida por la expresión:

$$h(\lambda) = f * g = \frac{1}{Cte} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot g(x - \lambda) dx$$

donde Cte es una constante de normalización. Es decir, es el resultado del producto de las áreas

coincidentes que forman dos curvas cuando una de ellas va desplazándose paralelamente sobre la otra.

Para la ejecución por ordenador de este producto entre funciones finitas no se necesita extrapolar la función convuelta hasta  $\pm\infty$ , sino simplemente crear una función periódica (asimétrica) a partir de la inicial, y realizar la convolución entre  $\pm 1$  ciclo. Por otra parte, debemos recordar la importancia de la constante (función de residual nula) de cara al sentido de correlación.

Este método, aplicado a las correlaciones de diagrfías se empleó a partir de los años sesenta, empezando por las correlaciones en el dominio original del espacio (ANSTEY, 1966; RUDMAN et al, 1973;...) y continuando con el dominio transformado de frecuencias (RUDMAN et al, 1975; MANN et al 1978; KWON et al, 1979;...). Muchos de estas técnicas se han desarrollado para diagrfías de buzamiento (KEMP, 1982; KERZNER, 1982; ...).

La utilización del primer dominio obtiene buenos resultados sólo en el caso de no producirse variaciones de espesor de las capas o zonas, mientras que el dominio de frecuencias es más útil para la caracterización de cada uno de los tramos de los sondeos, aunque no está del todo claro si la relación que se encuentre será vinculante para afirmar la existencia de correlación. En el tipo de acuífero que aquí se trata, la diversidad y el elevado número de capas producen espectros muy parecidos en todos los sondeos considerados de manera global.

##### Entrelazado

Esta técnica desarrollada por GORDON et al (1979) con el nombre de "Slotting" consiste en considerar los registros como series de elementos, y unirlos de forma que los elementos de cada serie queden intercalados entre los restantes, manteniendo el orden dentro de cada secuencia. Este entrelazado debe realizarse de forma que elementos similares de las dos series queden consecutivos en la nueva secuencia resultante, minimizando una función proporcional a la diferencia entre cada elemento y sus adyacentes. Esta técnica se "bloquea", según sus propios

autores, creando zonas donde no se produce las intercalaciones esperadas entre las dos series iniciales.

##### Cross-association

El término de *Cross-association* se utiliza por primera vez en correlaciones geológicas en 1965 (SACKIN et al), y fue desarrollado por diversos autores (HARBAUGH et al, 1968; SMITH et al, 1980; DAVIS, 1973; DIAZ CURIEL et al, 1986; STARTZMAN et al, 1987; WU et al, 1987; ...etc.).

Básicamente consiste en considerar las columnas litológicas de dos sondeos como dos vectores numéricos obtenidos previa creación de una serie de códigos; posteriormente se elabora una matriz cuyos valores sean los resultados de una distancia, según una métrica definida, entre cada par de componentes. Por último, se selecciona una alineación pseudo-diagonal de manera que pase por los valores mínimos de cada fila. Los pares de dicha alineación, representan los pares de correlación entre las dos columnas litológicas.

También en la línea de optimizar los procesos de correlación deben incluirse criterios de parecido o similitud que no incluyan la identidad entre los segmentos correlacionados. Este concepto aparece por primera vez con el término anglófono de "Fuzzy sets" (borroso) introducido por ZADEH en 1965. Consiste en incluir, mediante ciertos algoritmos, igualdades equivalentes a las realizadas "a ojo" tales como "prácticamente iguales" o "aproximadamente iguales".

Otras técnicas utilizadas para los procesos automáticos de correlación incluyen el diseño y reconocimiento de patrones, como los desarrollados por STEPHANOU (1979) y VINCENT et al (1979) que consisten en caracterizar, una vez segmentado un registro, los distintos segmentos según la forma de la curva, esto es, asignando códigos distintos para crestas, valles, inflexiones, picos, ...etc, diferenciándolos, a su vez, en función de sus respectivos espesores e intensidades. Incluso a nivel simple (considerando sólo pendientes) este tipo de análisis se utiliza como un elemento más dentro de sistemas de correlación complejos (FANG et al, 1992). La utilización de patrones es una téc-

nica muy eficaz en el caso de que no se realice la interpretación litológica de las diagrfías.

#### 5 SISTEMA DE CORRELACION EMPLEADO

En nuestro caso, la correlación final se realiza entre pares de sondeos teniendo en cuenta el conjunto de resultados obtenidos a través de la correlación de las columnas litológicas (capas) deducidas a partir de las diagrfías, y los derivados de la correlación de los tramos definidos en cada sondeo. La razón por la que no se han incluido en la correlación punto a punto, los análisis de la forma de los registros, tan utilizados en la actualidad, se deriva de la influencia que las características de los sondeos pueden tener en los registros, mientras que los resultados de la interpretación de éstos, se suponen independientes de dichas características.

Otro factor que se ha incluido en el sistema de correlación son las denominadas capas guía, cuya relevancia en este proceso se considera similar a los resultados de la correlación de tramos en lo que se refiere a la distancia entre sondeos. Dentro de los registros geofísicos, dichas capas se distinguen por alcanzar valores de algún parámetro (en especial G.N.) o espesores muy diferenciados del resto de las capas. Para la búsqueda de estas capas conviene tener presente, además, el gráfico obtenido en el proceso de clasificación automática de las litologías determinadas a partir de las diagrfías (DIAZ CURIEL, 1996), pues en dicho gráfico se pueden observar los puntos para los que el conjunto de los parámetros elegidos está muy diferenciado del resto.

##### 5.1 Correlación de Capas

Este proceso se realiza mediante la *cross-association* de columnas litológicas deducidas de la interpretación de las diagrfías y que vienen dadas por una serie de códigos que reflejan tanto las litologías "puras" como, en el caso de litologías mixtas, la litología predominante y la secundaria (DIAZ CURIEL, 1996).

Siguiendo con la descripción general del método realizada anteriormente, el punto de partida es definir una distancia que cumpla las condiciones



de una métrica y que cuantifique la correlación entre cada par de capas, K y J, que se intentan comparar, mediante la expresión:

$$D_{KJ} = \text{MIN} \{ (D_{K,J-1} + G_J), (D_{K-1,J-1} + d_{KJ}), (D_{K-1,J} + G_K) \}$$

siendo  $d_{KJ}=0$  para capas iguales,  $d_{KJ}=1$  para capas distintas,  $G_K = 1$  para  $K = 1, \dots, n$  (con  $n = n^\circ$  capas) y tomando de partida  $D_{0J} = D_{K0} = K$ .

A continuación, se define una matriz cuyos elementos son los resultados obtenidos en la comparación de todas las capas de dos sondeos que se quieran correlacionar.

Posteriormente se recorre la matriz desde el valor  $D_{\text{Imax}, \text{Jmax}}$  en sentido ascendente hasta llegar a la primera fila, eligiendo el camino que atraviesa los valores mínimos de cada fila. Los pares de elementos encontrados según esta alineación representan los pares de correlación.

En nuestro caso, se excluye la comparación entre los espesores de las capas, entendiendo que en acuíferos detríticos multicapa dichos espesores no mantienen una continuidad horizontal apropiada. No obstante, podrían incluirse como un factor más dentro de las consideraciones de las capas guía, en los casos de espesores muy elevados, o dentro de los criterios de similitud que se definen en los siguientes apartados.

A este método general de *Cross-association* hemos de añadirle una serie de modificaciones para alcanzar resultados fiables en series muy repetitivas (como es nuestro caso) y un conjunto de pautas que caractericen esta técnica para el caso de correlación de columnas litológicas, imprimiendo carácter geológico a los pares de correlación que se definan. Los criterios que se han añadido son:

1 – Exclusión de correlaciones cruzadas (este criterio no tendría validez en el caso de una tectónica compleja).

2 – Introducción de coeficientes de similitud entre capas. Algunos de los límites que diferencian las litologías consideradas tienen un carácter relativo (como es la separación arenas/gravas por el tamaño de grano) y más aún en litologías mixtas.

Por esa razón, hemos incluido una serie de criterios de equivalencia entre capas que impliquen un orden en el grado de similitud y que sean progresivamente más permisivos (desde idénticos hasta sólo similares). Estos criterios son muy importantes en este tipo de correlación pues, dada la exclusión de correlaciones cruzadas, la inclusión de nuevas correlaciones puede excluir otras anteriores. Los criterios, definidos en orden decreciente, han sido:

I) Litologías idénticas.

II) Alternancia entre las litologías predominante y secundaria.

III) Mismo predominante y secundario entre arena y limo, o entre limo y arcilla.

IV) Mismo predominante con cualquier secundario menos granito.

En principio, deberemos trabajar siempre con el primer criterio, pues la utilización de los demás requiere un conocimiento experto de sus implicaciones.

3 – Análisis de la última fila de la matriz de correlación. El primer problema que aparece al seguir este método, es el hecho de que el número de correlaciones sea muy bajo comparado con el número de capas, de forma que la elección del valor mínimo en la última fila anule las correlaciones posibles entre las últimas capas. Este problema se ha resuelto añadiendo otro criterio, que refleja una correlación en las últimas filas y eligiendo, de los dos criterios, aquél que consiga un mayor número de correlaciones.

4 – Selección de la ascendente de correlación. El segundo problema que podemos encontrar es que en muchos casos los valores de la matriz de correlación no reflejan una correlación en medida suficiente como para que el camino de valores mínimos pase por dicho punto. Por esa razón, caso de existir equivalencia entre capas se ha impuesto la condición de mínimo desvío del camino.

5 – Selección de pares de correlación. De todos los pares de correlación encontrados se seleccionan aquéllos que involucran dos capas equivalentes, siempre dentro del criterio de equivalencia elegido.

6 – Desviación por identidad. Si las dos capas comparadas pueden considerarse como capas guía (para litologías de granito o materia orgánica) siempre se acepta la correlación.

7 – El desplazamiento en profundidad que presente un par de correlación no puede ser mayor que un porcentaje máximo de su profundidad, pues de lo contrario, en este tipo de acuíferos, se incluirían correlaciones matemáticas que carecen de sentido geológico.

Todos estos criterios se han implementado en un programa para correlación de capas, que proporciona buenos resultados entre sondeos próximos.

En la figura 3 se presenta el resultado de la correlación encontrada siguiendo este método entre dos de los sondeos estudiados. En dicho gráfico, las líneas horizontales en cada columna representan las profundidades de las capas determinadas en cada sondeo (no se muestran los códigos litológico de cada capa debido a la escala del gráfico) y las líneas entre las dos columnas representan los pares de correlación determinados.

No obstante, al utilizar el programa entre sondeos distantes, se observó que se creaban distintos horizontes de correlación al invertir filas y columnas (o lo que es lo mismo, el orden de los sondeos). Una forma de evitar estas ambigüedades en los procesos de *cross-association* es emplear una especie de rangos de caracterización, con los que se realizaría primero la correlación entre los elementos de mayor rango, correspondientes a lo que llamamos "capas guía", para continuar después con los elementos de menor rango. Sin embargo, decidimos no incluir dicha posibilidad para evaluar el alcance de la correlación entre capas sin incluir dichos condicionantes.

## 5.2 Correlación de Tramos

Dado que el número de tramos determinados en los sondeos estudiados no es muy elevado (inferior a 20; DIAZ CUIEL, 1996), este proceso se realiza de forma individualizada a partir de la caracterización de dichos tramos y de los resultados del proceso de *cross-correlation* de los tra-

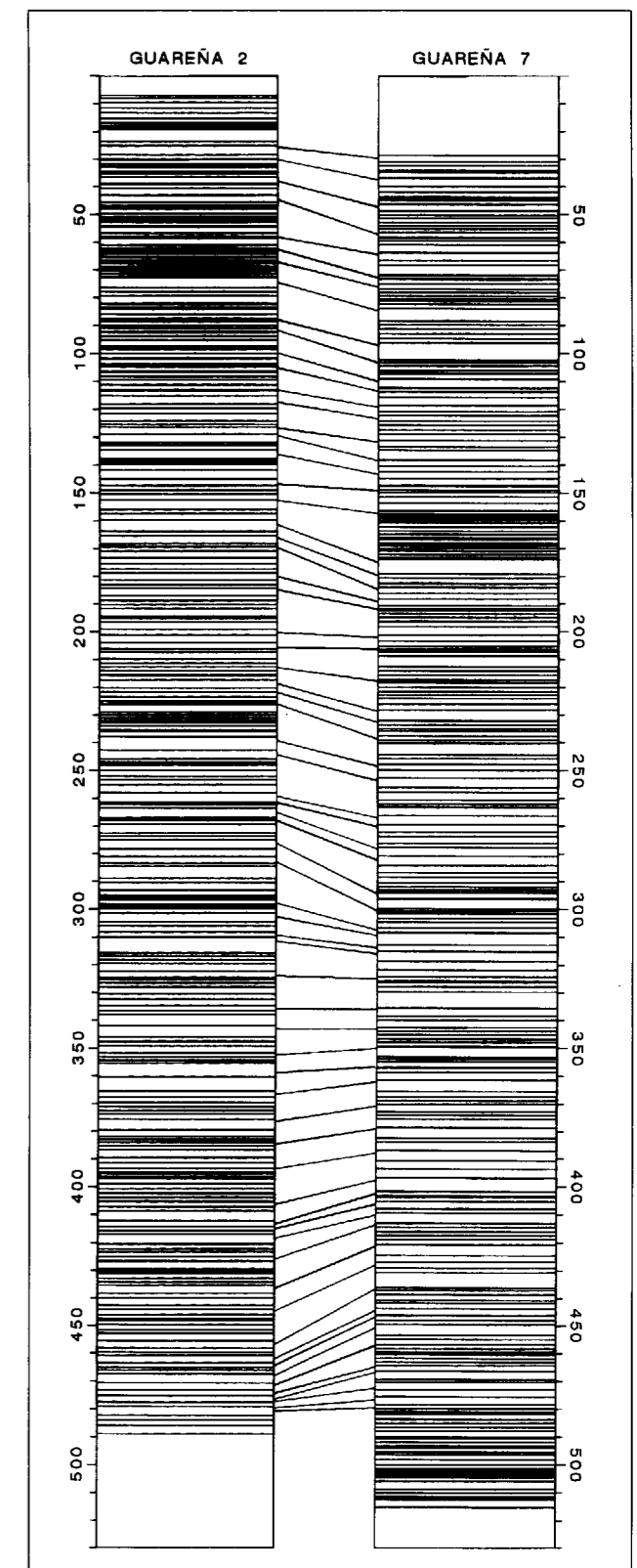


Figura 3 – Correlación entre columnas litológicas

mos definidos para los registros de R.N.C. y G.N. La elección de estos parámetros se debe a que se han mostrado como los más representativos para la realización de este proceso.

Para alcanzar grados de correlación significativos, es necesario realizar deformaciones de los espesores de los tramos de cada sondeo, de forma que coincidan los espesores de cada par de tramos comparados. Con este fin se modifica, para cada tramo del primer sondeo, la profundidad de todos los puntos de cada tramo del segundo sondeo de forma proporcional a su posición dentro del tramo y, posteriormente se definen los valores para las profundidades equidistantes iniciales mediante interpolaciones lineales.

Así pues, la *cross-correlation* se efectúa entre todos los tramos de los registros R.N.C. y G.N. del primer sondeo con los de esos mismos parámetros en el segundo sondeo, lo cuál resulta algo tedioso en el tiempo. Los resultados se presentan en forma de matriz, donde cada celda -n- de la fila -m- representa el valor normalizado de la *cross-correlation* entre el tramo -m- del primer sondeo y el tramo -n- del segundo sondeo.

Análogamente, se ha definido una matriz de disimilitudes (similar a la generada para la correlación de columnas litológicas) obtenida mediante diferencias de los valores de varianza, espesores medios y amplitudes medias de cada tramo (DIAZ CUIEL, 1996). Los puntos de la matriz con disimilitud más bajos nos indicarán los tramos más coincidentes (la selección de la correlación final se ha realizado excluyendo las correlaciones cruzadas).

En la figura 4 se presenta un ejemplo del resultado de la correlación entre los tramos de dos de los sondeos estudiados. Los trapecios que aparecen en la columna central del gráfico representan los pares de correlación determinados, pero sin cuantificar el grado de correlación entre cada par. Quiere esto decir que la correlación que se muestra es la mejor posible, matemáticamente hablando, para los tramos determinados en cada uno de los sondeos. En el penúltimo par de correlación de este ejemplo es donde, tras la deformación de espesores citada, dicha correlación alcanza un grado más elevado.

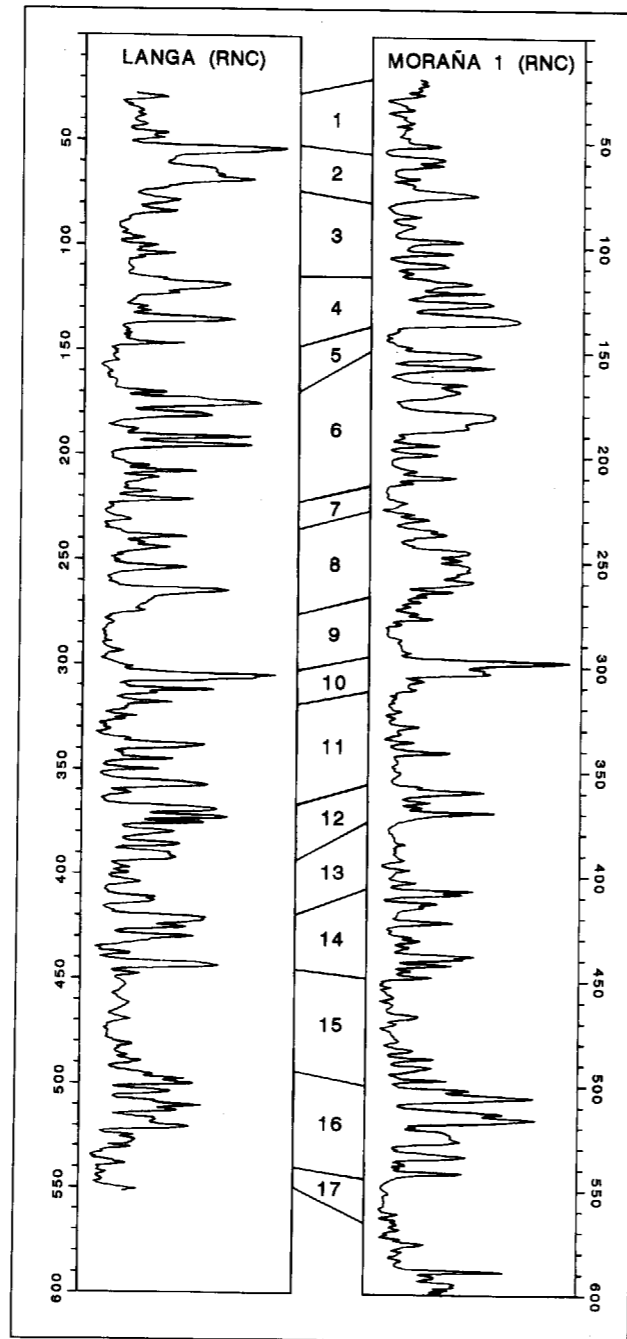


Figura 4 - Correlación entre Tramos

## 6 RESULTADOS OBTENIDOS

Con todo lo expuesto anteriormente se ha desarrollado un sistema para la correlación automática de diagrfías. La correlación final alcanzada es el resultado de la información conjunta de la

comparación dos a dos del conjunto de los sondeos, tanto entre las capas determinadas, como entre los tramos geofísicos de las diagrfías, sin pretensiones finales ni condicionantes geológicos previos.

Los niveles guía encontrados, como por ejemplo, las capas de emisividad gamma anómala en los sondeos Guareña 3 (a 483 m.), Guareña 4 (a 479 m.), Guareña 5 (a 490 m.), Guareña 6 (a 465 m.), Guareña 7 (a 492 m.), Guareña 8 (a 480 m.) y Guareña 9 (a 500 m.), se han introducido en el sistema como criterios condicionantes de los horizontes de correlación.

En primer lugar presentamos, en la figura 5, una correlación entre los 10 sondeos denominados Guareña 1 a 10, situados a distancias entre sí desde 1 a 7 km. Se ha elegido una representación

pseudo-tridimensional para visualizar conjuntamente los resultados de la correlación frente a la posición del sondeo. La trama utilizada (mediante combinación de colores), con la que se identifican los distintos tramos, indica que cada tramo está compuesto principalmente por una alternancia de capas cuya litología viene definida por sus respectivos colores en la leyenda, y no de una sola capa de litología mixta. Aunque los porcentajes de correlación entre estos sondeos son muy elevados, en torno al 70% de los tramos, en este gráfico sólo se presentan algunos de los horizontes encontrados para no enmarañar el gráfico, dado que el seguimiento de los demás horizontes de correlación a partir de esos dos es inmediato.

Debemos señalar la mayor correlacionabilidad de los tramos inferiores, esto es, la correlación entre

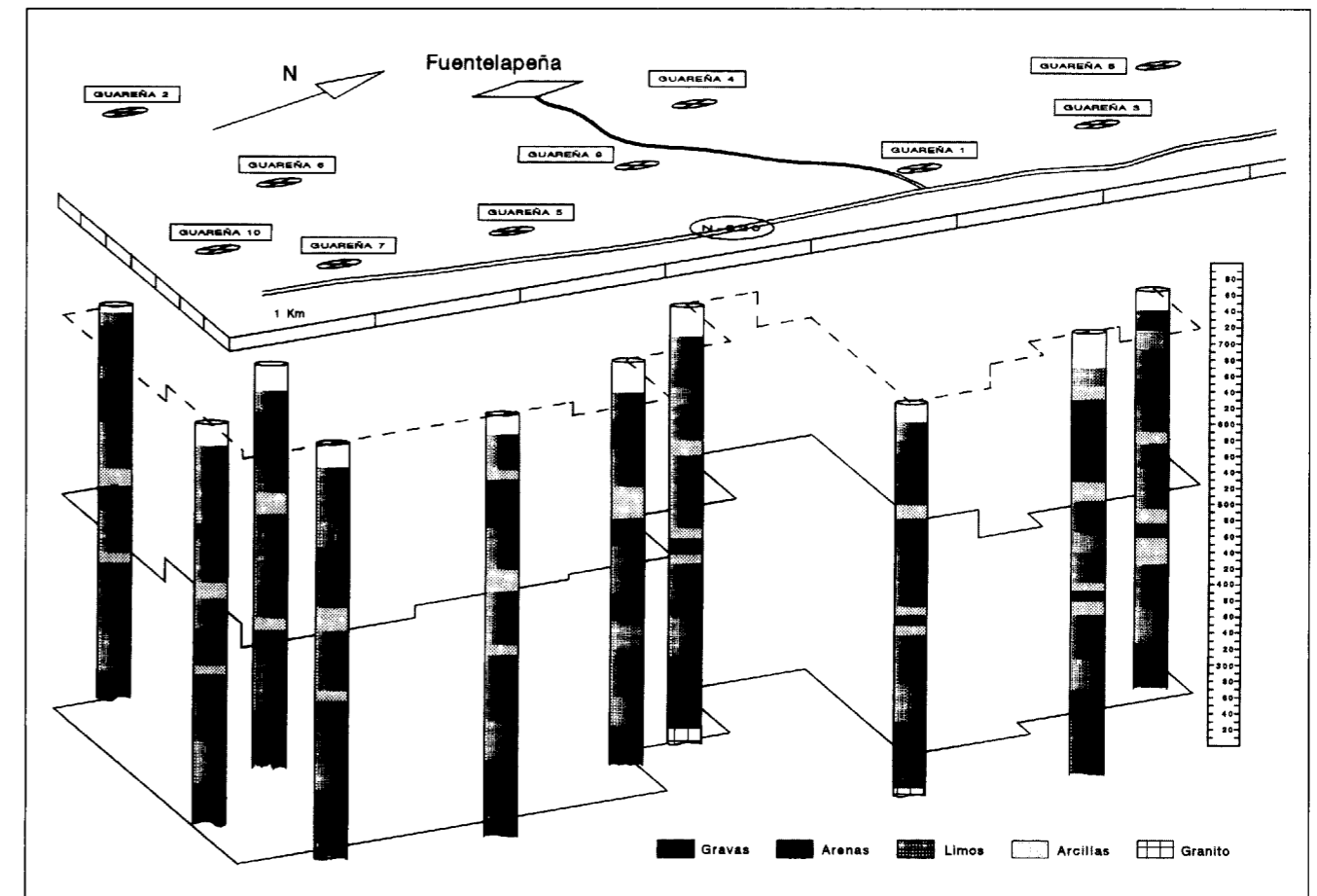


Figura 5 - Correlación entre los Sondeos de Guareña

los tramos que se encuentran a mayor profundidad, puede determinarse entre cualquier par de sondeos, mientras que, para los tramos superiores, el grado de correlación matemática es elevado sólo entre los sondeos más próximos (por ejemplo, Guareña 5, 7 y 10).

Otra característica a destacar en el conjunto de sondeos de Guareña, salvo en el sondeo Guareña 5, es la aparición de un tramo muy diferenciado en torno a 300 m. de profundidad, que corresponde casi exclusivamente a un nivel guía de gravas, encajado entre paquetes de arcilla que varían de espesor, llegando incluso a desaparecer.

Por último podemos indicar que, aunque se observan oscilaciones importantes en los espesores de los tramos correlacionados, las superfi-

cies de correlación resultan, en esta zona, prácticamente sub-horizontales.

En segundo lugar, se presenta la correlación encontrada en el conjunto de los sondeos (figura 6) mostrando sólo una columna para cada uno de los grupos de sondeos en Guareña, Armuña, Fuentelsol, Moraña y Coca. En dicha figura 6, se proyectan los resultados de los grupos de alineación Sur-Norte: Moraña-Fuentelsol, Langa-Aldeaseca-Goda y Adanero-Coca sobre el perfil de correlación PP'.

Aunque se pueden seguir algunos horizontes de correlación a lo largo de toda la zona estudiada, se podrían distinguir tres regiones diferenciadas. La región Noroeste con los sondeos de Guareña y Torrecilla. La región Centro-Noroeste representada por los sondeos de Armuña y en parte por el

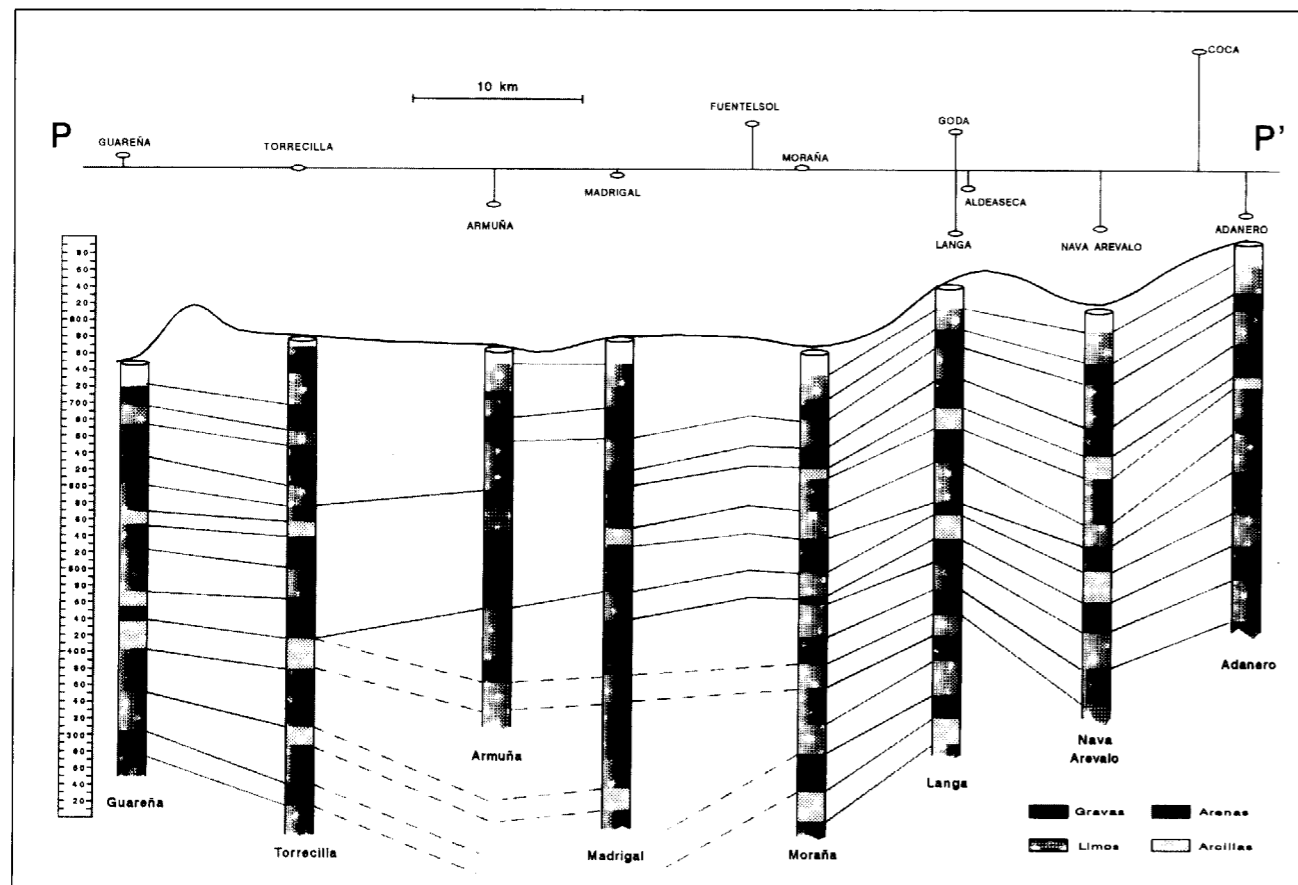


Figura 6 - Proyección sobre el Perfil de Correlación

de Madrigal. Por último, la región Oriental cuyos tramos aparecen agrupados en grandes secuencias y que, a pesar de su mayor extensión, mantiene porcentajes de correlación muy elevados.

Las correlaciones entre los sondeos situados en la región noroccidental y los situados en la región oriental se han dibujado en trazo discontinuo dado que, aunque se han determinado algunos pares de correlación, no se pueden seguir a lo largo de toda la zona de estudio. También se han dibujado en discontinuo algunos horizontes de correlación entre Madrigal y Moraña, dado que su seguimiento se ha realizado a través de los sondeos de Fuentelsol.

La región con menor grado de correlación es la región Centro-Noroeste, en la que se presentan unos tramos superiores de alta energía muy diferenciados, que pueden correlacionarse con los sondeos más noroccidentales de la región Este. Esta distinción con el resto de las regiones coincide con la diferenciación que muestran los tipos de aguas analizadas y con la presencia de algunos niveles de margas en los sondeos situados en esta región.

Los horizontes de correlación se muestran más horizontales en la mitad Oeste que en la Este, debido en parte a la diferente situación Norte-Sur de los sondeos de la parte oriental.

## 7 EVALUACION CORRELACION-DISTANCIA

Mediante el estudio de porcentajes de correlación con la distancia, pretendemos evaluar el alcance de las correlaciones en un medio estratigráfico como el estudiado, para lo que se ha analizado por un lado la correlacionabilidad de las capas y por otro, la de los tramos.

La correlación encontrada entre las capas, aunque su aspecto gráfico es muy contundente, parece presentar carencias de sentido geológico en muchos de los pares encontrados, debido a la continua alternancia de casi todas las litologías presentes (sobre todo, de las cuatro dominantes). El alcance efectivo de dichas correlaciones podemos situarlo en torno a 5 km.

No obstante, dicha correlación proporciona dos

aportes importantes a la correlación definitiva, por un lado las direcciones globales de correlación y por otro lado, la discriminación en el caso de ambigüedades, sobre todo ante la presencia de litologías menos abundantes (especialmente los niveles de gravas). De esta forma la validez de los resultados proporcionados por este sistema de correlación será tanto mayor cuanto más diferenciación exista en las series litológicas de los sondeos.

La correlación de tramos, en cambio, tiene un alcance mucho mayor. En la figura 7 se muestran dos curvas que representan la envolvente de los porcentajes de correlación encontrados entre los tramos de los distintos sondeos frente a la distancia entre éstos.

El aumento de la separación entre las dos bandas de correlacionabilidad se debe a el hecho de encontrar distintas regiones dentro de nuestra zona de estudio. Así para sondeos de la región Este, distanciados 35 km como Coca y Langa, se encuentra una correlación del 38%, mientras que otros pertenecientes a regiones distintas, como Madrigal y Adanero separados 42 km, muestran un porcentaje mucho menor (22%). De esta forma la curva superior representa los porcentajes esperados de correlación entre tramos si nos mantenemos en una misma región, mientras que la curva inferior correspondería al caso de atravesar regiones relativamente diferenciadas.

## 8 CONCLUSIONES

Por todo lo expuesto, se puede afirmar que la correlación de los tramos o zonas de las diagrfías geofísicas se perfila como el método más eficaz en la compleja correlación de sondeos en cuencas detríticas multicapa, para alcanzar una interpretación geológica e hidrogeológica global.

La automatización del proceso nos proporciona, además, una abstracción inicial del conjunto, facilitando el posterior estudio hidrogeológico de cara a optimizar la gestión de los recursos hídricos de estas cuencas (ubicación, explotación y planificación de sondeos).

En este sentido, dentro de las variables estudiadas en cada tramo, la frecuencia de capas (o sus

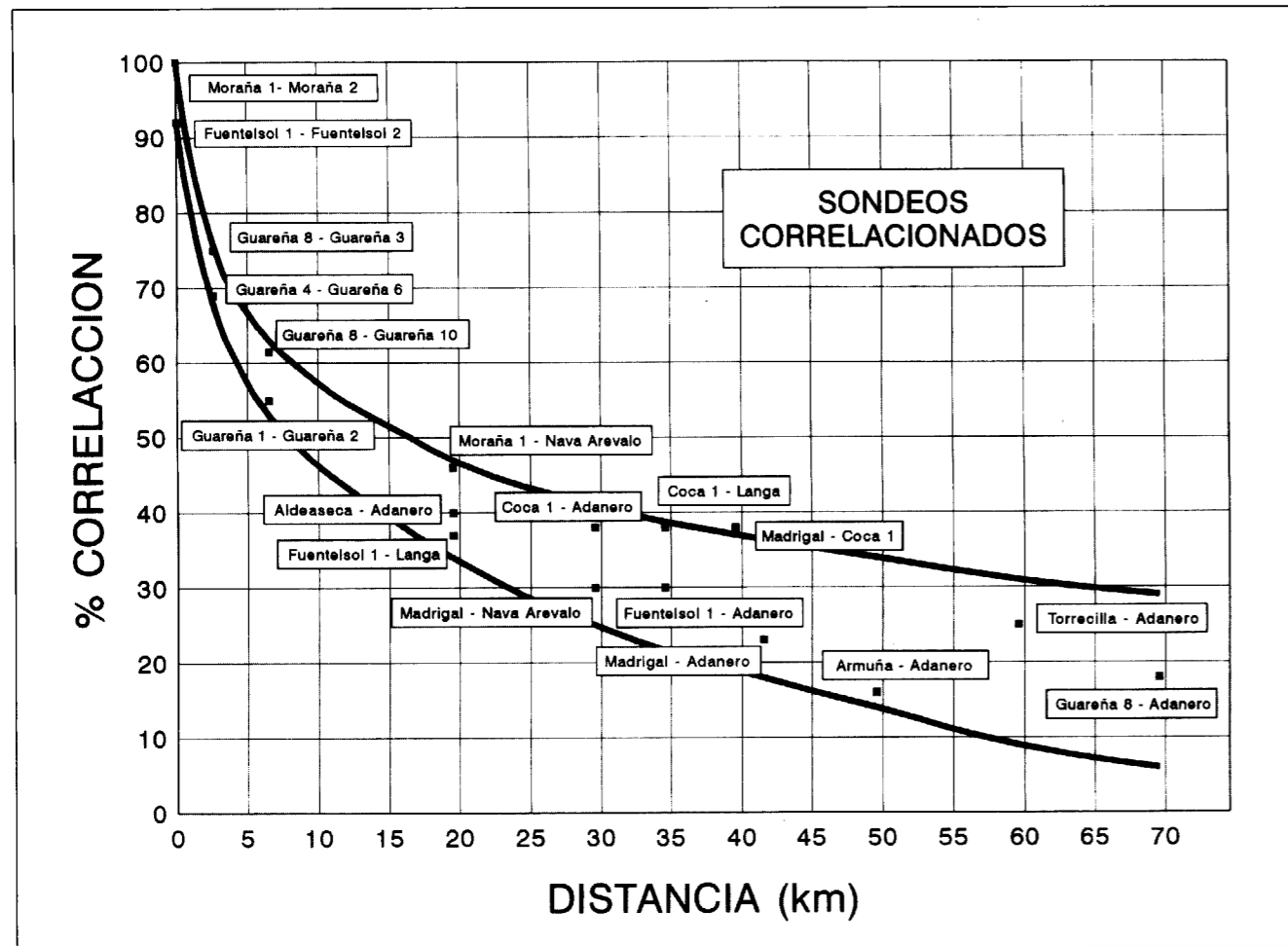


Figura 7 - Correlacionabilidad de los tramos frente a la distancia entre sondeos

longitudes de onda proporcionales a los espesores) no parece aportar información decisiva de cara a la correlación de tramos, lo cual tiene cierto sentido geológico salvo en los casos de capas que puedan caracterizarse como capas guía por su elevado espesor. En cambio, los valores de varianza en cada tramo si se han mostrado importantes a la hora de correlacionarlos, aunque en muchos casos esa variable estadística se muestre proporcional a los valores de la amplitud media en cada tramo.

Los datos aportados sobre cada tramo junto con los resultados de las correlaciones entre pares de sondeos, son decisivos a la hora de una correlación completa. Sin embargo, en este proceso siguen siendo de vital importancia ciertas decisiones que corresponden al interpretador y que

involucran conocimientos relativos a la geología de la zona que se estudie.

Esta metodología representa un primer avance en los aportes que el procesado automático de diagrfías proporciona en el conocimiento geológico de cuencas detríticas. Señalemos, como ejemplo, que en algunos casos, determinadas secuencias de dos tramos geofísicos pueden corresponder a un ciclo sedimentario, mientras que en otros casos, dichos ciclos estarían formados por secuencias de más tramos. Un siguiente paso para aumentar el grado de información que pueden aportar las diagrfías en este campo, sería tratar de establecer, bajo criterios físico-matemáticos, el carácter de las secuencias sedimentarias (positivas o negativas) dentro de cada tramo. Estos aspectos, que conllevan un conoci-

miento geológico más profundo y que pueden incluirse dentro de un posterior sistema experto, tal y como comentábamos en la introducción, se presentan en publicaciones complementarias a ésta.

Por último debemos señalar, aunque no se haya hecho hincapié a lo largo de esta comunicación, el interés que este tipo de correlaciones puede tener de cara a su utilización dentro de otros campos de la ingeniería (Geotecnia, Minería, etc.).

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la Delegación del I.R.Y.D.A. en Valladolid, de la empresa TRAGSA y de la Dirección General Estructuras Agrarias de la Consejería de Agricultura y Ganadería de la Junta de Castilla y León.

Asimismo, agradecemos la colaboración de Carmen Caballero y Domingo Martín (Licenciados en Ciencias Geológicas) y de la delegación del I.T.G.E en Valladolid, en la recopilación bibliográfica de la geología de la zona.

#### REFERENCIAS

- ANSTEY, N.A. (1966): "Correlation Techniques, a Review". Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists, vol. 2, 1-28.
- DAVIS, J.C. (1973): "Statistics and Data Analysis in Geology". John Wiley, New York.
- DIAZ CUIEL, J. DOMINGUEZ, S. NAVAS, J. & ROZYCKI, A. (1986): "La Cross-Association en la Correlación Litológica de Registros Geofísicos y Muestras de Sondeos". Congreso Nacional de Geología. Granada (España).
- DIAZ CUIEL, J. MARTIN, D. & MALDONADO, A. (1995): "Correlación de Sondeos mediante Diagrfías. Aplicación al Tercio Oeste de Madrid". Tierra y Tecnología, nº 10.
- DIAZ CUIEL, J.M. (1996): "Interpretación y Correlación Automáticas de Diagrfías Geofísicas. Aplicación a la Hidrogeología en el Sur de la Cuenca del Duero". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- FANG, J.H. CHEN, H.C. SHULTZ, A.W. & MAHMOUD, W. (1992): "Computer-Aided Well Log Correlation". AAPG Bulletin, vol 76, nº 3, 307-317.
- GORDON, A.D. & REYMENT, R.A. (1979): "Slotting of Borehole Sequences". Journal of Mathematical Geology, vol. 11, 309-327.

HARBAUGH, J.W. & MERRIAM, D.F. (1968): "Computer Applications in Stratigraphic Analysis". John Wiley, New York.

I.T.G.E. (1980 - antes I.G.M.E.): "Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Duero. Sistemas 8 y 12" (Plan Nal. de Inv. de Aguas Subterráneas). Servicio de Publicaciones del Mº de Industria y Energía.

JIMENEZ, E. CORROCHANO, A. & ALONSO GAVILAN, G. (1983): "El Paleógeno de la Cuenca del Duero". En RIOS, J.M.: "Libro Jubilar. Geología de España", 3 tomos, I.T.G.E.

KEMP, F. (1982): "An Algorithm for the Stratigraphic Correlation of Well Logs". Journal of Mathematical Geology, vol. 14, 271-285.

KERZNER, M.G. (1983): "An Analytical Approach to Detailed Deep Determination Using Frequency Analysis". Trans. S.P.W.L.A, 23 Logging Symposium.

KWON, B.D. & RUDMAN, A.J. (1979): "Correlation of Geologic Log with Spectral Methods". Journal of Mathematical Geology, vol. 11, 373-390.

MANN, C.J. & DOWELL, T.P.L. (1978): "Quantitative Lithostratigraphic Correlation of Subsurface Sequences". Computers and Geosciences, vol. 4, 295-306.

MEDIAVILLA, R.M.<sup>a</sup> & DABRIO, C.J. (1988): "Controles Sedimentarios Neógenos en la Depresión del Duero (Sector Central)". Rev. Soc. Geol. España, vol 1, 187-195.

MULHOLLAND, J.W. (1994): "Sequence Stratigraphic Correlation of Well-Log Cross Sections". The Mountain Geologist, vol. 31, nº 3, p. 65-75.

OLEA, R.A. (1994): "Expert Systems for Automated Correlation and Interpretation of Wireline Logs". Mathematical Geology, vol. 26, nº 18, p. 879-897.

PORTERO, J.M. DEL OLMO, P. OLIVE, A. (1983): "El Neógeno de la Transversal Norte-Sur de la Cuenca del Duero". En RIOS, J.M.: "Libro Jubilar. Geología de España", 3 tomos, I.T.G.E.

RIEUWERTS, H. (1989): "GEOLOGIX: An Interactive Knowledge-based Well Correlation System". Reprinted in 1996, in Expert System in Engineering Applications: Society of Petroleum Engineers Reprint Series, nº 41, p. 110-119.

ROLANDI, M. BONED, M. JIMENEZ, S. (1989): "Primeros Resultados en la Red Automatizada de Control de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Moraña, tras dos Años de Funcionamiento (1986-1988)". Hidrogeología y Recursos Hídricos, vol XIV, Madrid.

RUDMAN, A.J. & LANKSTON, R.W. (1973): "Stratigraphic Correlation of Well-Logs by Computer Techniques". American Association of Petroleum Geologist Bulletin 57, 577-588.

RUDMAN, A.J. BLAKELY, R.F. & HENDERSON, G.J. (1975): "Frequency Domain Methods of Stratigraphic Correlation". Proceedings of the 7th Offshore Technology Conference, Houston, Texas.

SACKIN, SNEATH & MERRIAM (1965): "ALGOL Program for Cross-Association of No-numeric Sequences Using a Medium Size Computer". Kansas Geological Survey Sp. Dist. Publ. 23, 26 p.

SMITH, T.F. & WATERMAN, M.S. (1980): "New Stratigraphic Correlation Techniques". Journal of Geology 88, 451-457.

STARTZMAN, R.A. & KUO, T.B. (1987): "An Artificial Intelligence Approach to Well Log Correlation". The Log Analyst March-April 175-183. Later reprinted in 1996, in Expert system in engineering applications: Society of Petroleum Engineers Reprint Series, n<sup>o</sup> 41, p. 120-128.

STEPHANOU, H.E. (1979) - "Multilevel Syntax Analysis for Geological Data Compression". Instrument Society of America Transactions, vol 18, 101-104.

VINCENT, PH., GARTNER, J.E. & ATTALI, G. (1979): "An Approach to Detailed Dip Determination Using Correlation by Pattern Recognition". Jour. Pet. Tech. vol. 31, 232-240.

WU, X. and NYLAND, E. (1987): "Automated Stratigraphic Interpretation of Well-Log Data". Geophysics, vol 52, n<sup>o</sup> 12, p. 1665-1676.

ZADEH, L.A. (1965): "Fuzzy Sets". Information and Control, vol 8, 338-353.

Original recibido: Enero 1998.  
Original aceptado: Marzo 1998.

## A NEW MACRODONT ANCHITHERE (EQUIDAE) FROM THE LATE ARAGONIAN (MIOCENE) OF MADRID (SPAIN)

Por C. IÑIGO (\*)

### R E S U M E N

Se revisa el équido de Paracuellos-V (Paracuellos del Jarama, Madrid), y se clasifica como: *Anchitherium jaramense* n. sp. Este nuevo anquitérido macrodonto, del Aragoniense superior de la Península Ibérica, es más grande que *Anchitherium ezquerrae*, pero más pequeño que *Anchitherium sampelayoi*, tiene reducidos el P<sup>1</sup> y el M<sup>2</sup>, y sus huesos postcraneales presentan diferencias de robustez con las especies descritas.

*Palabras clave:* Anchitheriine, Equidae, Taxonomía, Nueva especie, Mioceno, España.

### A B S T R A C T

The equid from Paracuellos-V (Paracuellos del Jarama, Madrid) is reviewed, and determined as *Anchitherium jaramense* n. sp. This new macrodont anchithere, from the late Aragonian of the Iberian Peninsula, is larger than *Anchitherium ezquerrae*, but smaller than *Anchitherium sampelayoi*, its P<sup>1</sup> and M<sup>2</sup> are reduced and its postcranial bones present differences about their robustness with the described species.

*Key words:* Anchitheriine, Equidae, Taxonomy, New species, Miocene, Spain.

### INTRODUCTION

In the Madrid area, there are many miocene sites from the middle-late Aragonian (ALBERDI *et al.*, 1985b; HERRAEZ, 1994), and *Anchitherium* is one of the most characteristic macromammals of their faunal list. MEYER (1844) described *Anchitherium ezquerrae* in Cerro de San Isidro (Madrid), but after PRADO (1864) most Spanish authors considered it synonymous of *Anchitherium aurelianense*. There are many reports of this species in Spain (HERNANDEZ-PACHECO & DANTIN, 1915; DUPUY & FERNANDEZ, 1918; HERNANDEZ-PACHECO, 1926, 1930; RUIZ *et al.*, 1946; CRUSAFONT & TRUYOLS, 1957; CRUSAFONT & CELORRIO, 1959; BONE *et al.*, 1980; HERRAEZ & ALBERDI, 1983, ALBERDI *et al.*, 1985a), but ABUSCH (1983) and IÑIGO (1993) only recognized it in Buñol (Valencia). These authors supported the validity of *A. ezquerrae* and

assigned to it the populations from many sites of the internal basins (Tajo, Duero, Ebro and Calatayud-Teruel basins). In Spain, two more species have been identified: *Anchitherium sampelayoi* (VILLALTA & CRUSAFONT, 1945) from the early Vallesian of Nombrevilla (Zaragoza) and *Anchitherium corcolense* (IÑIGO, 1997) from the early Aragonian of Córcoles (Guadalajara). In Eurasia, out of the Iberian Peninsula, the most frequent anchithere is *Anchitherium aurelianense* (ATALAY, 1981; ABUSCH, 1983; FORSTEN, 1990), but two more species have been described: *Anchitherium zitteli* (SCHLOSSER, 1903), from the Chinese Vallesian, and *Anchitherium karpinskii* (BORISSIAK, 1945), from the late Aragonian of Bielometchetskaya (Caucasus).

This paper reviews the anchithere from Paracuellos-V (Paracuellos del Jarama, Madrid), which was described as *Anchitherium aurelianense*, and it is referred to a new species, *Anchitherium jaramense* n. sp.

(\*) IES Velázquez, Velázquez, 25, Móstoles, Madrid; y Museo Geominero, ITGE, Ríos Rosas 23, E-28003 Madrid.

## MATERIAL AND METHOD

The material is housed in the Museo Nacional de Ciencias Naturales (Madrid, Spain), and it comprises the following remains: Fragments of maxillary (PAV-177, PAV-485, N<sup>o</sup> MNCN-7672), upper cheek teeth (PAV-70, PAV-197, PAV-205, PAV-526), fragments of mandibula (PAV-143, PAV-173), lower cheek teeth (PAV-70, PAV-98, PAV-132, PAV-149, PAV-154, PAV-194, PAV-302, PAV-308, PAV-310, PAV-534, N<sup>o</sup>MNCN-7588), incisors (PAV-419, PAV-504), canines (PAV-106, PAV-108, PAV-245), scaphoids (PAV-147, PAV-254, PAV-349, PAV-384, PAV-397), lunata (PAV-17, PAV-20, PAV-354, PAV-387), magna (PAV-25, PAV-42, PAV-167, PAV-351, PAV-439), pyramidals (PAV-515), MclI (PAV-530), MclII (PAV-489), MclV (N<sup>o</sup>MNCN-8009), astragali (PAV-37, PAV-159, PAV-162, PAV-188, PAV-241, PAV-334, PAV-335, PAV-433, PAV-539), naviculars (PAV-45, PAV-260, PAV-342, PAV-383, PAV-529, PAV-554), cuboids (PAV-546, N<sup>o</sup>MNCN-7680), big cuneiforms (PAV-21), MtlI (PAV-407, N<sup>o</sup>MNCN-8009), MtlII (PAV-329, PAV-543), first central phalanges (PAV-43, PAV-221, PAV-330, PAV-412, PAV-413, PAV-463), second central phalanges (PAV-337, PAV-339, PAV-340, PAV-341), first lateral phalanges (PAV-356), second lateral phalanges (PAV-503, PAV-511).

The metrical methodology follows the "Hipparion conference" (EISENMANN *et al.*, 1981), but the teeth are measured at the base of the crown. The cheek teeth are differentiated following the criteria of HERRAEZ & ALBERDI (1983) and IÑIGO (1993). The significance of the metrical differences between molars has been investigated using the one-way Model II analysis of variance. Both the size of teeth and postcranial bones has been compared by ratio diagrams (SIMPSON, 1941), and the same method has been used to compare the dimensions of astragali and of first central phalanges. Data of these postcranial bones have been analysed by discriminant analysis (DA) to determine the possible overlapping among the anchitheres compared. The following measurements were considered:

- Astragalus: 1 (maximal length), 2 (maximal diameter of the medial condyle), 3 (breadth of the trochlea), 4 (maximal breadth), 5 (distal articular breadth), 6 (distal articular depth) and 7 (maximal medial depth).

- First central phalanx: 1 (maximal length), 2 (anterior length), 3 (minimal breadth), 4 (proximal breadth), 5 (proximal depth), 7 (distal articular breadth) and 8 (distal articular depth).

## SYSTEMATIC PALEONTOLOGY

Order PERISSODACTYLA OWEN, 1848  
Family EQUIDAE GRAY, 1821  
Subfamily ANCHITHERIINAE LEIDY, 1869

Genus *Anchitherium* MEYER, 1844

*Anchitherium jaramense* n. sp.  
Plate I, figs. 2-6.

1985 *Anchitherium aurelianense*; ALBERDI *et al.*, pp. 62-66, pl. 1, figs. 1-3, 4 and 8-9.

**Holotype.** PAV-485. Fragment of left maxillary with all the cheek teeth (P<sup>1</sup>-M<sup>3</sup>). Museo Nacional de Ciencias Naturales, C.S.I.C. (Spain).

**Type locality.** Paracuellos-V (Paracuellos del Jarama, Madrid).

**Type stratigraphic level.** Miocene, late Aragonian. MN 6 mammal unit.

**Derivation of the name.** From the river Jarama, near the locality.

**Diagnosis.** Macrodon anchithere with much larger teeth than *A. ezquerrae* (Mean length of the series P<sup>2</sup>-M<sup>3</sup> = 145.8mm. Mean length of the M<sup>1-2</sup> = 27.32 mm. Mean length of the M<sub>1-2</sub> = 24.85mm). In the upper series the first premolar and the last molar are reduced. The lower cheek teeth have a deep groove between the metaconid and the metastylid. The postcranial skeleton is larger and more robust than that of *A. ezquerrae*.

**Description.** This material is much more abundant than that referred to *A. aurelianense* by ALBERDI *et al.* (1985a). These authors noticed that the anchithere from Paracuellos-V has larger dentition and smaller postcranial skeleton than the population from Sansan. Later, IÑIGO (1993) considered it a macrodon anchithere and classified it as *A. ezquerrae*, but the material from Paracuellos-V has very important differences

with this species that cannot be considered intraspecific variability.

The dentition is much larger than that of *A. ezquerrae*, but in the upper series the first premolar and the last molar are reduced (Figs. 1-2). In the upper cheek teeth the protoconule is poorly differentiated and the hypoconule is not marked, the crochet is present in 7 out of 13 specimens (54%), only 1 out of 7 M<sup>1-2</sup> (14%) has a very weak internal cingulum, but this cingulum is present on premolars and M<sup>3</sup>, and the hypostyle can be separated from the metaloph (N<sup>o</sup>MNCN-7672). In the lower cheek teeth there is a deep groove between the metaconid and the metastylid, the external cingulum is very weak and the hypostylid is strong.

The postcranial bones are larger and more robust than those of *A. ezquerrae*. In the fore limb, the MclI has a very small and poorly marked facet for the magnum, and in this bone the MclI-facet is similar, when it exists (2 out of 5 specimens, 40%). In the hind limb, 3 out of 8 astragali (37%) have a large re-entrant on the external edge of the navicular-facet, surrounding a rough area for the attachment of ligaments, 1 out of 6 naviculars (17%) presents little developed rough surfaces on their proximal and distal faces, joined to the external edge, and the MtlII do not present any surface for the attachment of ligaments on their proximal face. The facets between the navicular and the cuboid are very large, in this bone the navicular-facet is much larger than that for the big cuneiform. In the first central phalanx, 5 out

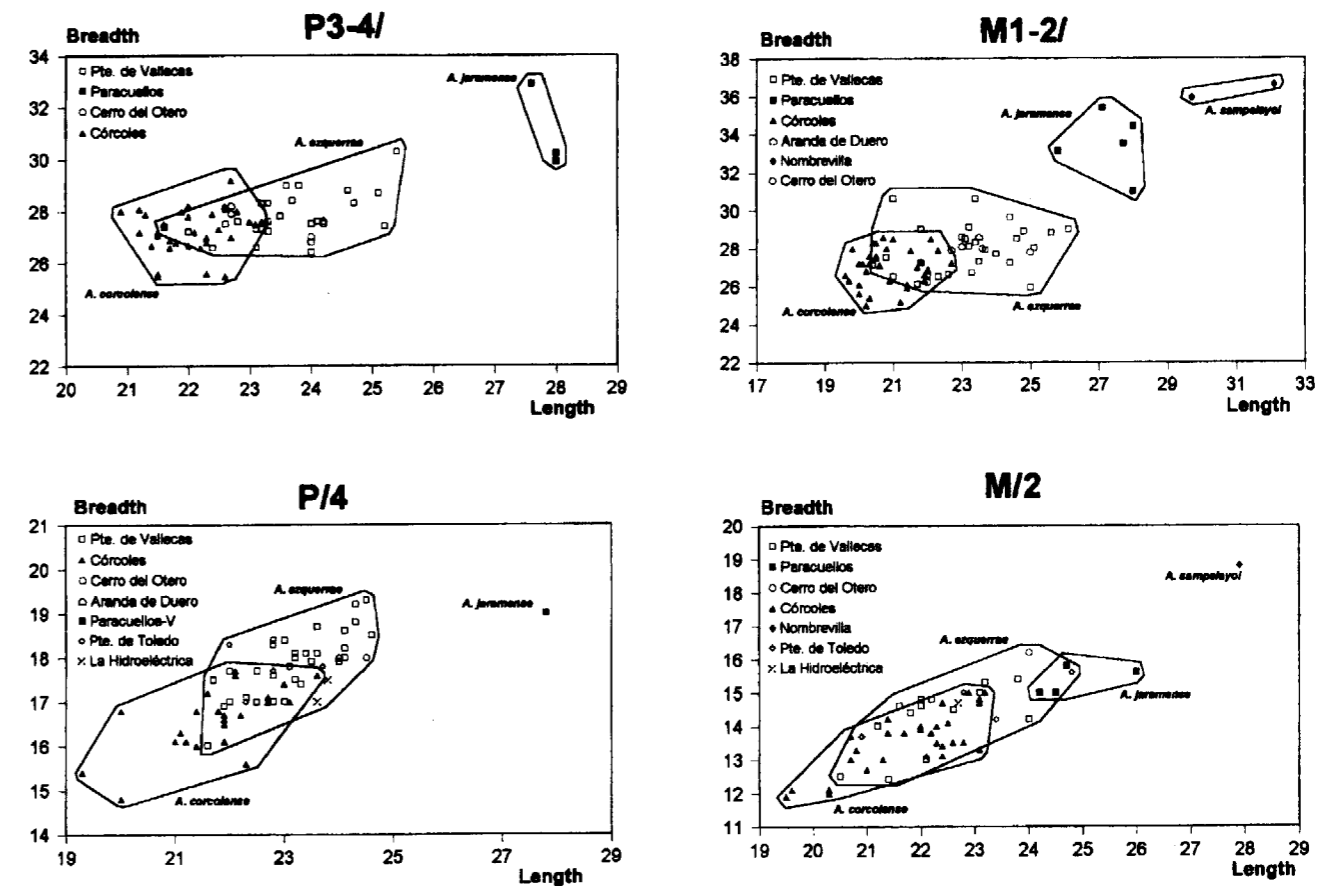


Fig. 1. Bivariate plot of the dentition of macrodon anchitheres. Measurements in millimetres.

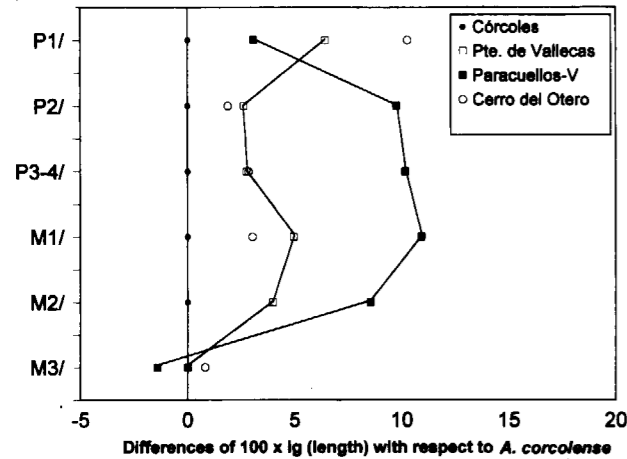


Fig. 2. Ratio diagram of upper cheek teeth of *A. corcolense* (from Córcoles), *A. ezquerrae* (from Puente de Vallecas and Cerro del Otero) and *A. jaramense* n. sp. (from Paracuellos-V).

of 7 specimens (71%) has trigonium and 3 out of 7 (43%) has a well marked rough apophysis on the lateral edges of the posterior face.

#### DISCUSSION

The anchitheres from the internal basins of the Iberian Peninsula have much larger teeth than *A. aurelianense*, with respect to their body size (Fig. 3), and, because of this, they have been named macrodont anchitheres (IÑIGO, 1993, 1997). Their dentition presents allometric differences with the microdont anchitheres from Central Europe, and the dimensions of their postcranial bones are different (IÑIGO, 1997). The

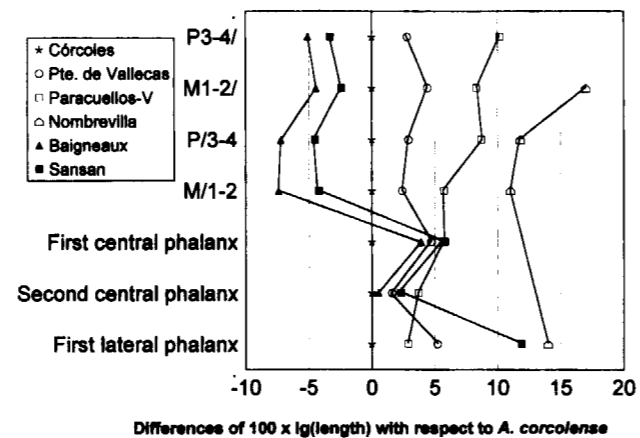


Fig. 3. Ratio diagram of teeth and postcranial bones of *A. corcolense* (from Córcoles), *A. ezquerrae* (from Puente de Vallecas), *A. jaramense* n. sp. (from Paracuellos-V), *A. sampelayoi* (from Nombrevilla) and *A. aurelianense* (from Baigneaux and Sansan).

most widely spread macrodont anchithere is *A. ezquerrae*, which is present in many sites from the middle-late Aragonian (ABUSCH, 1983; IÑIGO, 1993). The other ones only have been identified in one site: *A. corcolense*, from the early Aragonian of Córcoles, and *A. sampelayoi*, from the Vallesian of Nombrevilla. The population from Paracuellos-V must be referred to a macrodont anchithere (Fig. 3), but it presents very important differences with the described species.

The cheek teeth are larger than those of *A. corcolense* and *A. ezquerrae*, but much smaller than those of *A. sampelayoi* (Fig. 1). ALBERDI *et al.* (1985a) noticed that the cheek teeth series from

Fig. 1. *Anchitherium sampelayoi* (Villalta & Crusafont). Museo Geominero, 1175M. Fragment of right mandibula, with P<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>, internal view. Nombrevilla. Vallesian.

Fig. 2. *Anchitherium jaramense* n. sp. Museo Nacional de Ciencias Naturales, PA-V-485 (Holotype). Fragment of left maxilar, with P<sub>1</sub>-M<sub>3</sub>, occlusal view. Paracuellos-V. Late Aragonian.

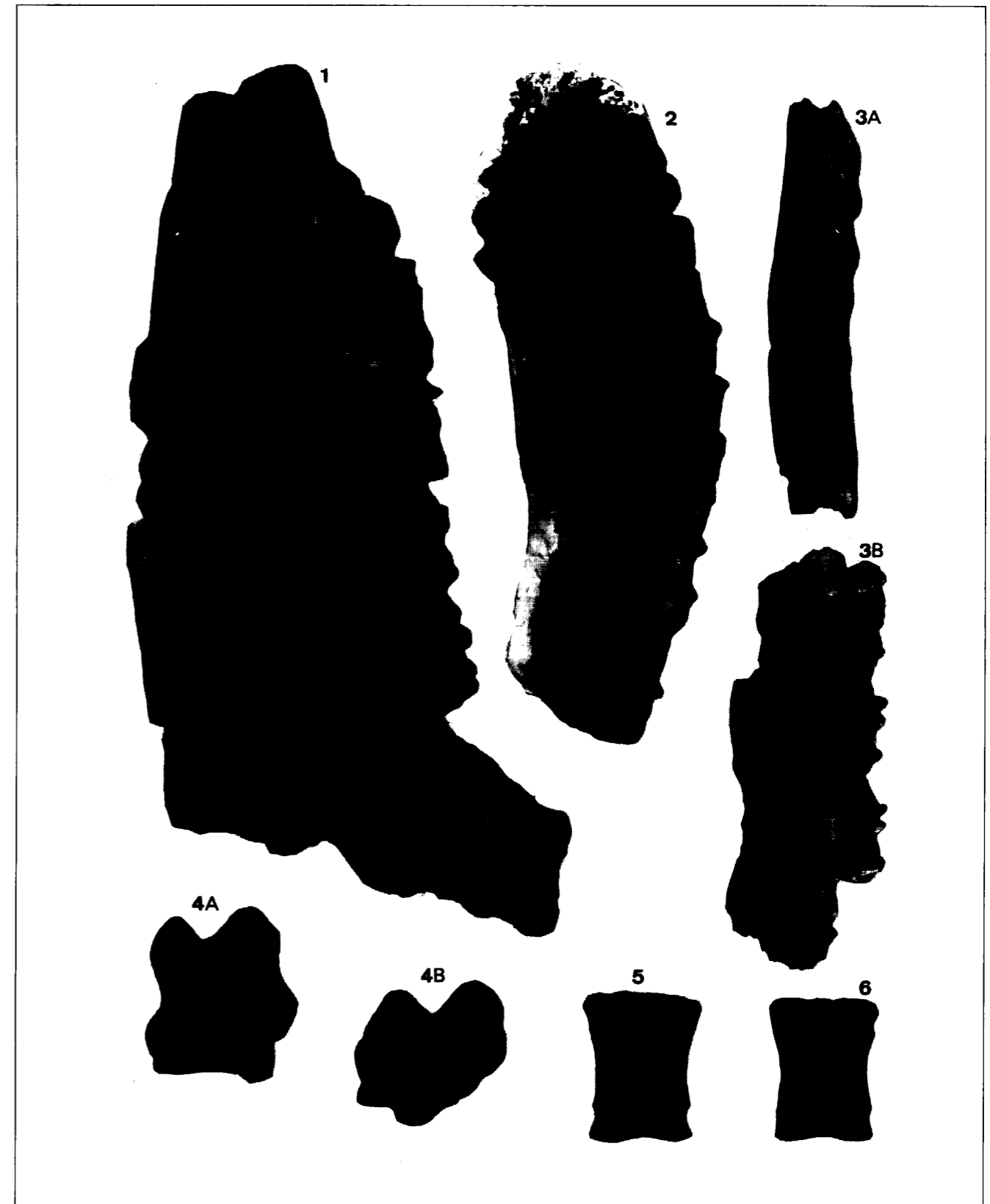
Fig. 3. *A. jaramense* n. sp. Museo Nacional de Ciencias Naturales, PA-V-51. Fragment of right mandibula, with D<sub>2</sub>-D<sub>4</sub>, A occlusal view, B internal view. Paracuellos-V.

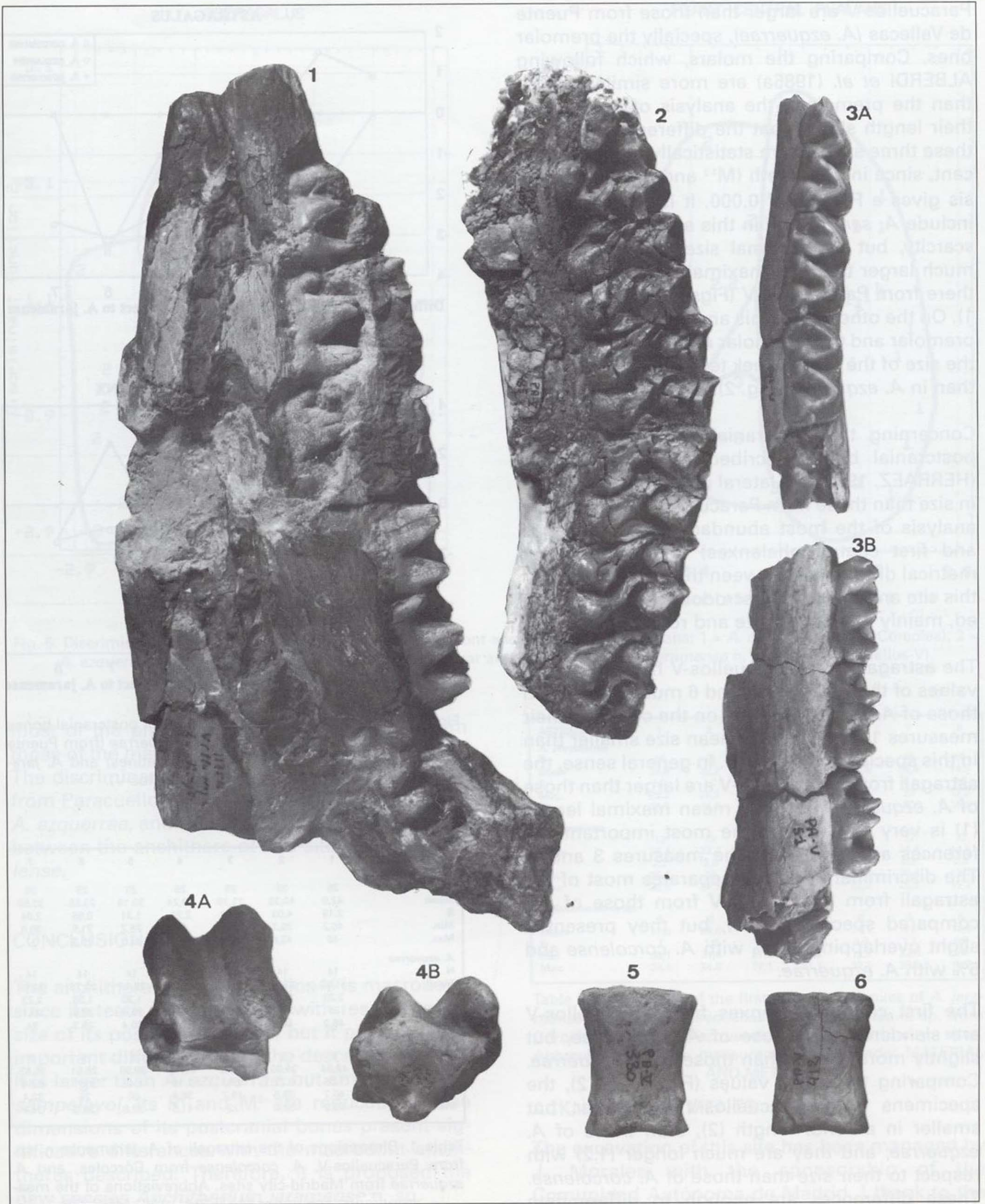
Fig. 4. *A. jaramense* n. sp. Museo Nacional de Ciencias Naturales, PA-V-37. Left astragalus, A anterior view, B distal view. Paracuellos-V.

Fig. 5. *A. jaramense* n. sp. Museo Nacional de Ciencias Naturales, PA-V-330. Fore first central phalanx, anterior view. Paracuellos-V.

Fig. 6. *A. jaramense* n. sp. Museo Nacional de Ciencias Naturales, PA-V-412. Hind first central phalanx, anterior view. Paracuellos-V.

(All figures x 0.75)







Paracuellos-V are larger than those from Puente de Vallecas (*A. ezquerrae*), specially the premolar ones. Comparing the molars, which following ALBERDI *et al.* (1985a) are more similar in size than the premolars, the analysis of variance of their length shows that the differences between these three species are statistically highly significant, since in both teeth ( $M^{1,2}$  and  $M_{1,2}$ ) the analysis gives a P-value of 0.000. It is not possible to include *A. sampelayoi* in this analysis, due to its scarcity, but the minimal size of their teeth is much larger than the maximal size of the anchithere from Paracuellos-V (Figs. 1 and 3; Pl. I, fig. 1). On the other hand, this anchithere has the first premolar and the last molar reduced, considering the size of the other cheek teeth, they are smaller than in *A. ezquerrae* (Fig. 2).

Concerning the postcranial skeleton, the only postcranial bone described of *A. sampelayoi* (HERRAEZ, 1982) is a lateral phalanx much larger in size than those from Paracuellos-V (Fig. 3). The analysis of the most abundant bones (astragali and first central phalanxes) shows important metrical differences between the anchithere from this site and the other macrodont species described, mainly referred to size and robustness.

The astragali from Paracuellos-V have the mean values of the measures 4 and 6 much larger than those of *A. corcolense*, but, on the contrary, their measures 1 and 2 have a mean size smaller than in this species (Fig. 4, tbl. 1). In general sense, the astragali from Paracuellos-V are larger than those of *A. ezquerrae*, but their mean maximal length (1) is very similar, and the most important differences are referred to the measures 3 and 4. The discriminant analysis separates most of the astragali from Paracuellos-V from those of the compared species (Fig. 5), but they present a slight overlapping: 3.3% with *A. corcolense* and 5% with *A. ezquerrae*.

The first central phalanxes from Paracuellos-V are slenderer than those of *A. corcolense*, but slightly more robust than those of *A. ezquerrae*. Comparing the mean values (Fig. 4, tbl. 2), the specimens from Paracuellos-V are larger, but smaller in anterior length (2), than those of *A. ezquerrae*, and they are much longer (1,2) with respect to their size than those of *A. corcolense*. These differences are enough to differentiate

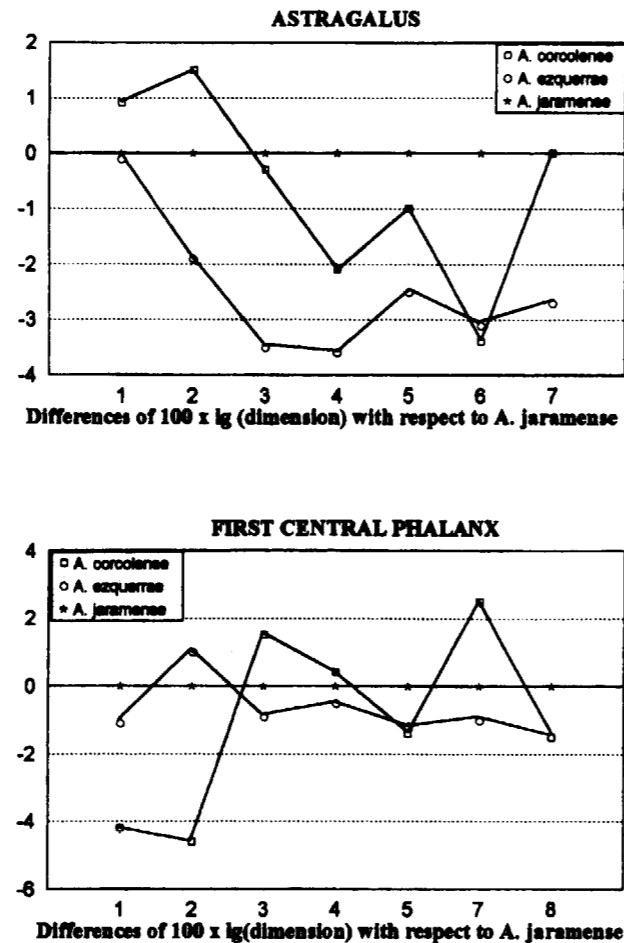


Fig. 4. Ratio diagram of the most abundant postcranial bones of *A. corcolense* (from Córcoles), *A. ezquerrae* (from Puente de Vallecas, Arroyo del Olivar and Moratines) and *A. jaramense* n. sp. (from Paracuellos-V).

ASTRAGALUS	1	2	3	4	5	6	7
<i>A. corcolense</i>							
N	25	25	25	25	25	25	25
Mean	42,9	40,38	21,19	38,24	30,19	23,56	33,59
S	2,19	4,03	0,63	2,21	1,31	0,95	2,94
Min.	40,2	35,7	19,1	35	28,2	21,9	30,8
Max.	46	43,6	22,5	41,3	32,3	25,9	37
<i>A. ezquerrae</i>							
N	14	14	14	14	14	14	14
Mean	41,92	37,31	19,68	36,93	29,14	23,73	31,49
S	3,29	3,43	0,95	3,00	1,30	1,36	2,23
Min.	39	35,3	18	34,2	25,4	21,8	29,1
Max.	46,2	40,8	21,3	39,4	30,4	26,3	34
<i>A. jaramense</i> n. sp.							
N	5	5	5	5	5	5	5
Mean	42,04	39,00	21,32	40,15	30,90	25,51	35,53
S	1,66	0,22	0,87	1,16	1,48	0,61	0,54
Min	40,7	38,5	19,7	38,6	30	25	32,4
Max	43,9	39,6	22	41,6	32,8	26,9	34,4

Table 1. Dimensions of the astragali of *A. jaramense* n. sp. from Paracuellos-V, *A. corcolense* from Córcoles, and *A. ezquerrae* from Madrid-city sites. Abbreviations of the measurements: see under MATERIAL AND METHOD.

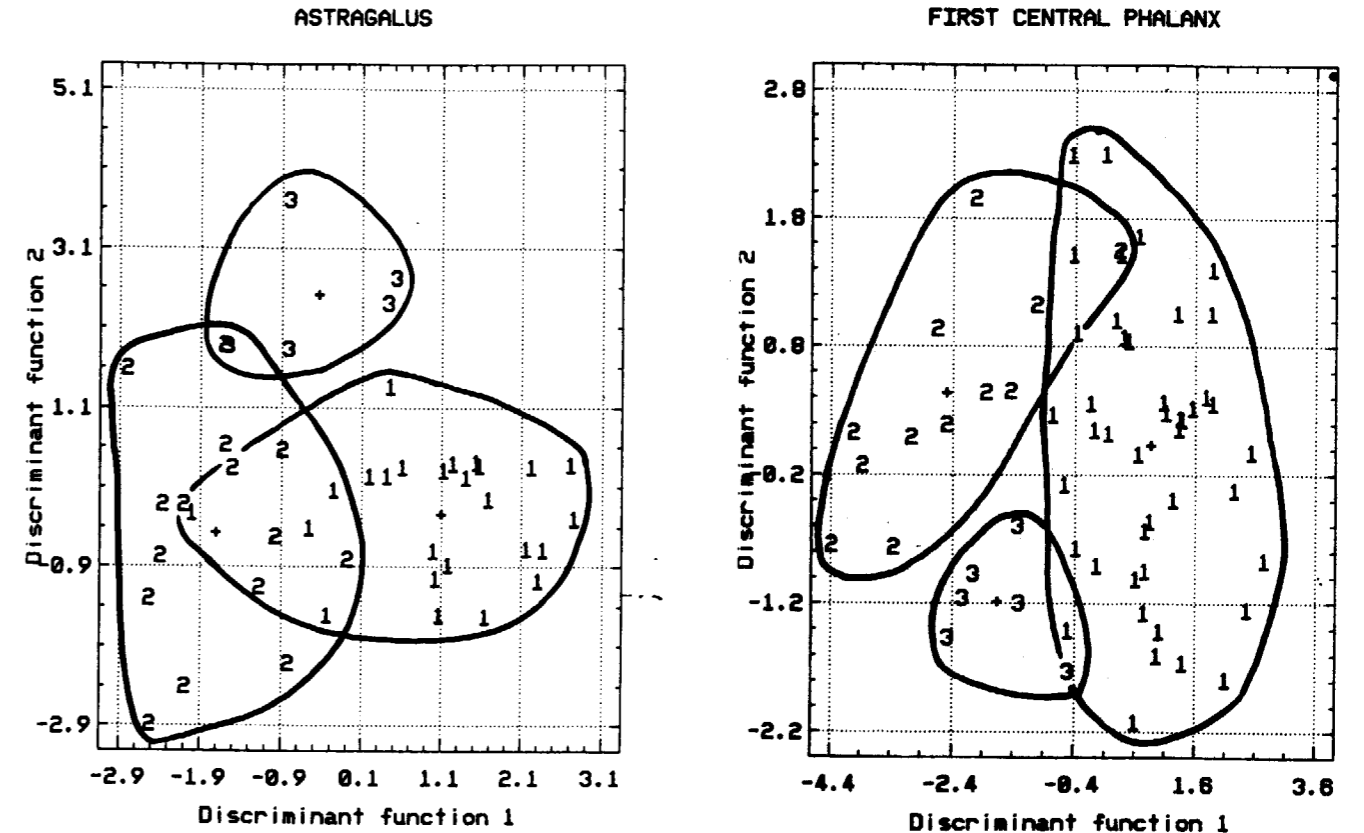


Fig. 5. Discriminant analysis of postcranial bones of macrodont anchitheres. Abbreviations: 1 = *A. corcolense* (from Córcoles); 2 = *A. ezquerrae* (from Puente de Vallecas, Arrollo del Olivar and Moratines); 3 = *A. jaramense* n. sp. (from Paracuellos-V).

most of the phalanxes from Paracuellos-V from those of the macrodont species described (Fig. 5). The discriminant analysis puts all the specimens from Paracuellos-V away from those assigned to *A. ezquerrae*, and assesses a 5.8% of overlapping between the anchithere of this site and *A. corcolense*.

CONCLUSIONS

The anchithere from Paracuellos-V is macrodont, since its teeth are very large, with respect to the size of its postcranial bones, but it presents very important differences with the described species. It is larger than *A. ezquerrae*, but smaller than *A. sampelayoi*, its P<sup>1</sup> and M<sup>3</sup> are reduced and the dimensions of its postcranial bones present significant differences with the macrodont anchitheres described. Therefore, it is proposed the new species *Anchitherium jaramense* n. sp.

ASTRAGALUS	1	2	3	4	5	7	8
<i>A. corcolense</i>							
N	46	46	46	46	46	46	46
Mean	33,9	30,2	23,5	29,2	20,5	26,5	14,3
S	1,9	1,7	1,7	1,5	1,1	1,4	0,8
Min.	29,2	25,9	25,9	25,6	18,1	23	12,9
Max.	38,7	34,2	34,2	32,7	22,4	30	16,3
<i>A. ezquerrae</i>							
N	12	12	12	12	12	12	12
Mean	36,4	34,4	22,2	28,5	20,6	24,4	14,3
S	2,2	2,3	0,7	1	1,2	0,9	0,8
Min.	33,1	30	21,2	27,2	18,2	23,3	13,1
Max.	39,8	37,7	23,2	30	22,3	26,2	15,3
<i>A. jaramense</i> n. sp.							
N	6	6	6	6	6	6	6
Mean	37,3	33,6	22,7	28,9	21,1	25	14,8
S	1	1,2	1	1,6	0,9	1,1	0,6
Min	36,1	31,4	21,5	27,1	19,9	23,8	14
Max	38,3	34,6	24,1	31,7	22,6	26,7	15,6

Table 2. Dimensions of the first central phalanxes of *A. jaramense* n. sp. from Paracuellos-V, *A. corcolense* n. sp. from Córcoles, and *A. ezquerrae* from Madrid-city sites. Abbreviations of the measurements: see under MATERIAL AND METHOD.

ACKNOWLEDGEMENTS

The excavation of this site has been managed by J. Morales with the sponsorship of the Comunidad Autónoma de Madrid. I thank to the

curator of the vertebrate collection of the Museo Nacional de Ciencias Naturales (Spain), where the material from Paracuellos-V is housed, and to Uly Martín (Complutense University) for the photographs.

## REFERENCES

- ABUSCH-SIEWERT, S. 1983. Gebissmorphologische Untersuchungen an eurasiatischen Anchitherien (Equidae, Mammalia) unter besonderer Berücksichtigung der Fundstelle Sandelzhausen. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 62, 1-361.
- ALBERDI, M.T., CERDEÑO, E. & HERRAEZ, E. 1985a. Perissodactyla de la provincia de Madrid. En: *Geología y Paleontología del Terciario continental de la provincia de Madrid* (Coord. M.T. Alberdi). Servicio de publicaciones del C.S.I.C., 61-80.
- ALBERDI, M.T., HOYOS, M., MAZO, A.V., MORALES, J., SESE, C. & SORIA, D. 1985b. Bioestratigrafía, paleoecología y biogeografía del Terciario de la provincia de Madrid. En: *Geología y Paleontología del Terciario continental de la provincia de Madrid* (Coord. M.T. Alberdi). Servicio de publicaciones del C.S.I.C., 99-105.
- ATALAY, Z. 1981. On the presence of *Anchitherium aurelianense* (Cuvier) from the middle Miocene of Çandır (Ankara). *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 24, 75-77.
- BONE, E., ALBERDI, M.T., HOYOS, M. & LOPEZ, N. 1980. Prospection paléontologique de la région de Torralba de Ribota (Burdigalien du Bassin de Calatayud, España). *Paleovertebrata*, 233-247.
- BORISSIAK, A. 1945. On the Equidae from the Middle Miocene of Northern Caucasus. *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS*, 3, 3-51.
- CRUSAFONT, M. & CELORRIO, J.M. 1959. Sobre un yacimiento de mamíferos fósiles en Aranda de Duero (Burgos). *Estudios Geológicos*, 15, 41-44.
- CRUSAFONT, M. & TRUYOLS, J. 1957. Descubrimiento del primer yacimiento de mamíferos miocénicos de la cuenca Valenciana. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 48, 3-22.
- DUPUY, E. & FERNANDEZ, D.C. 1918. Nota acerca de un yacimiento de mamíferos fósiles en el Rincón de Ademuz (Valencia). *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, 39, 297-348.
- EISENMANN, V., ALBERDI, M.T., DE GIULI, C. & STAESCHE, U. 1981. *Studying Fossil Horses*. E. J. Brill, 72 pp.
- FORSTEN, A. 1990. *Anchitherium* from Pasalar, Turkey. *Journal of Human Evolution*, 19, 471-478.

HERNANDEZ-PACHECO, E. & DANTIN, J. 1915. Geología y Paleontología del Mioceno de Palencia. *Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas*, 5, 248-251.

HERNANDEZ-PACHECO, F. 1926. Un nuevo yacimiento de Vertebrados fósiles del Mioceno de Madrid. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 26, 392-395.

HERNANDEZ-PACHECO, F. 1930. Fisiografía, Geología y Paleontología del Terciario de Valladolid. *Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas*, 37, 1-205.

HERRAEZ, E. 1982. *Estudio descriptivo y taxonómico del Anchitherium aurelianense (Cuvier) del yacimiento de Puente de Vallecas (Madrid)*. Unpublished minor thesis. Universidad Complutense de Madrid. 191 pp.

HERRAEZ, E. 1994. *Micromamíferos (Roedores y Lagomorfos) del Mioceno del área de Madrid: estudio sistemático y biostratigráfico*. Unpublished Ph. D. Thesis. Universidad Complutense de Madrid. 338 pp.

HERRAEZ, E. & ALBERDI, M.T. 1983. *Anchitherium aurelianense* del yacimiento del Puente de Vallecas. *Estudios Geológicos*, 39, 409-415.

IÑIGO, C. 1993. *Estudio de los Perisodáctilos del yacimiento Mioceno de Córcoles. (Guadalajara)*. Unpublished Ph. D. Thesis, Universidad Complutense de Madrid. 559 pp.

IÑIGO, C. 1997. *Anchitherium corcolense* nov. sp, a new anchitherine (Equidae, Mammalia) from the early Aragonian site of Córcoles (Guadalajara, Spain). *Geobios*, 30, 849-869.

MEYER, H. VON. 1844. Die fossilen Knochen aus dem Tertiär-Gebilde des Cerro de San Isidro bei Madrid. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie und Petrefaktenkunde*, 1844, 289-310.

PRADO, C. DE. 1864. *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid*. Junta General de Estadística, 219 pp.

RUIZ, M., VILLALTA, J.F. & CRUSAFONT, M. 1946. El yacimiento de mamíferos fósiles de Las Yeseras de Monteagudo (Navarra). *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 16, 157-182.

SCHLOSSER, M. 1903. Die fossilen Säugetier Chinas nebst einer Odontographie der recenten Antolopen. *Abhandlungen der königlichen bayerischen Akademie der Wissenschaften*, 2. Cl., 22 (1), 221 pp.

SIMPSON, G.G. 1941. Large Pleistocene felines of North America. *American Museum Novitates*, 1136, 1-27.

VILLALTA, J.F. & CRUSAFONT, M. 1945. *Anchitherium sampeyai* n. sp, un *Anchitherium* en el Pontense español. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 14, 49-82.

Original recibido: Enero 1998.  
Original aceptado: Abril 1998.

## PROCESO DE DATOS GRAVIMETRICOS EN EL PROYECTO INTEGRADO DE ESTUDIO GEOLOGICO Y METALOGENETICO DE LA FAJA PIRITICA.

Por F. M. RUBIO (\*) y J. L. PLATA (\*)

## RESUMEN

El Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), ha finalizado recientemente un proyecto multidisciplinario de cobertura regional, sobre un área de 6000 km<sup>2</sup>, y cuyo objetivo es el de revisar el conocimiento geológico de la Faja Pirítica. En este artículo se presenta el procesado de los datos gravimétricos, durante el cual ha tenido lugar un importante trabajo de desarrollo metodológico con el fin de optimizar, diseñar y actualizar nuevos sistemas de procesado y análisis de estos datos geofísicos, siendo el resultado del proceso la obtención de los documentos necesarios para la posterior interpretación de los datos. El esquema del proceso y la mayor parte del software empleado ha sido desarrollado en el área de Geofísica del ITGE.

**Palabras clave:** Gravimetría, Filtrado digital, Continuación de campos, Componente residual, Componente regional, Anomalía de Bouguer, Mallado.

## ABSTRACT

The Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) has recently finished a multidisciplinary Project of regional coverage, over an area of about 6000 km<sup>2</sup>, which aims to revise the geological knowledge of the Pyrite Belt. An important development task has taken place with the objective of the optimization, design and update of new processing and analysis methods of geophysical data, in order to produce a variety of documents to undertake the analysis and interpretation, using a software an process flux mainly developed by The Geophysical área of ITGE. In this paper, the gravity data processing will be presented.

**Key words:** Gravimetry, Digital filtering, Field continuation, Residual component, Regional component, Bouguer anomalie, Gridding.

## INTRODUCCION

El ITGE ha acometido un Proyecto Integrado de Estudio Geológico y Metalogenético de la Faja Pirítica, uno de cuyos objetivos es el análisis de la expresión geofísica de las diversas unidades estructurales, estableciendo sus límites, así como su implicación en áreas de interés minero, a través del establecimiento de unos modelos de interpretación. Para cumplir este objetivo el Area de Geofísica del ITGE ha llevado a cabo una serie de estudios y actividades, dentro de los cuales un

aspecto muy importante lo constituye el proceso de los datos gravimétricos disponibles de la zona de trabajo.

El procesado de los datos gravimétricos tiene como objetivo final el obtener los documentos más adecuados sobre los que posteriormente basar la interpretación, en la que se han utilizado las técnicas más actualizadas de análisis, mediante superposición de capas de información en SIG y procesos de imágenes, efectuándose una descripción cualitativa de los mapas de anomalías gravimétricas, la identificación de rasgos estructurales (ejes de anomalías, discontinuidades

(\*) Area de Geofísica y Teledetección del ITGE.

des y alineaciones) y una interpretación del origen de las anomalías por comparación con la información geológica de superficie, a una escala regional (I. T. G. E. 1995).

Dado que este proyecto constituye un buen ejemplo de explotación de trabajos de campos potenciales con gran cobertura de datos, se ha aprovechado esta oportunidad para el desarrollo de estudios metodológicos con el fin de automatizar, optimizar, diseñar y poner a punto una metodología a emplear en las diferentes fases del proceso, que además servirán de referencia en futuros proyectos de este tipo.

ORIGEN DE LOS DATOS

Los datos gravimétricos utilizados proceden del Proyecto "Gravimetría estructural en la Faja de Minerales Píriticos del S.O. de España (1992)", financiado por la Dirección General de Minas y el Instituto Tecnológico Geominero de España, actuando como operadores ADARO, GEXA y el propio ITGE, y que consistió en la recopilación selectiva de los datos existentes de gravimetría y en la medición de nuevas estaciones gravimétri-

cas, completándose un conjunto de 12 hojas del M.T.N. a escala 1:50.000; la cobertura obtenida se describe en la tabla 1 y se muestra en la figura 1; la distribución resultante es muy irregular, ya que comprende desde zonas donde la distancia entre estaciones es inferior a 100 m hasta grandes áreas con distancias superiores a 1500 m entre estaciones, siendo en promedio de 4.5 estaciones por kilómetro cuadrado.

TABLA 1  
Cobertura de los datos Gravimétricos por Hojas 1:50.000

NUMERO DE HOJA	NOMBRE	NUMERO DE PUNTOS
936	Paymogo	1310
937	El Cerro de Andévalo	2468
938	Nerva	1977
939	El Castillo de las Guardas	1976
958	Puebla de Guzmán	1796
959	Calañas	4242
960	Valverde del Camino	2267
961	Aznalcóllar	2067
980	San Silvestre de Guzmán	2153
981	Gibraleón	3887
982	La Palma del Condado	1986
983	Sanlúcar la Mayor	2217
<b>TOTAL</b>		<b>28346</b>

Todos los datos de campo, tanto los recopilados como los medidos en el mencionado proyecto,

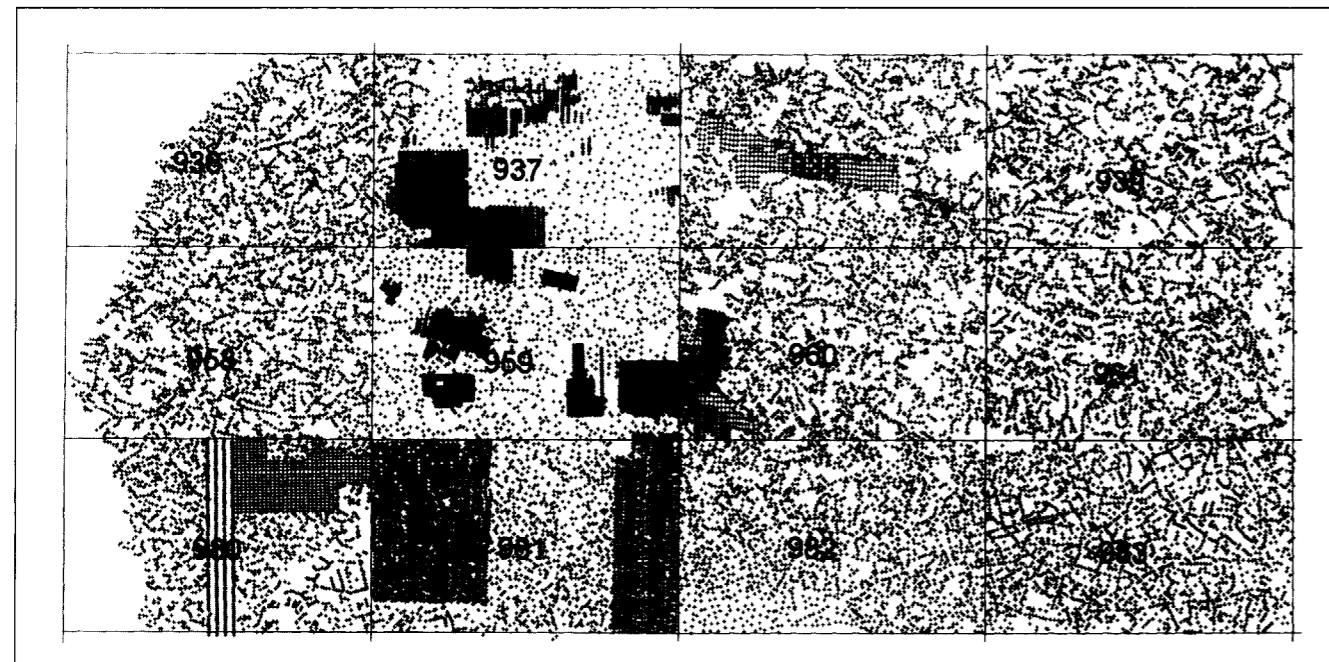


Figura 1.- Cobertura de los datos gravimétricos utilizados, sobre la distribución de hojas a escala 1:50.000 de la zona.

han sido procesados de nuevo conjuntamente para obtener el valor de la anomalía de Bouguer, adoptando una densidad de reducción homogénea de 2.6 g/cm<sup>3</sup>.

PROCESO DE DATOS GRAVIMETRICOS

El proceso se ha efectuado en varias etapas; en una primera fase de preprocesado se engloban todos los aspectos concernientes a la preparación de los datos y su primera manipulación dejándolos disponibles para las fases posteriores. El esquema seguido está sintetizado en el cuadro 1, en el que se indica el flujo de datos y tipo de proceso, así como la forma en que se obtienen los resultados: en malla regular, como capa en SIG (Arc/Info), o como imagen.

En la fase de preproceso, se han llevado a cabo las siguientes etapas:

- \* Paso de los datos a **malla regular**.
- \* **Diseño de filtros** pasa baja para eliminación de ruidos.

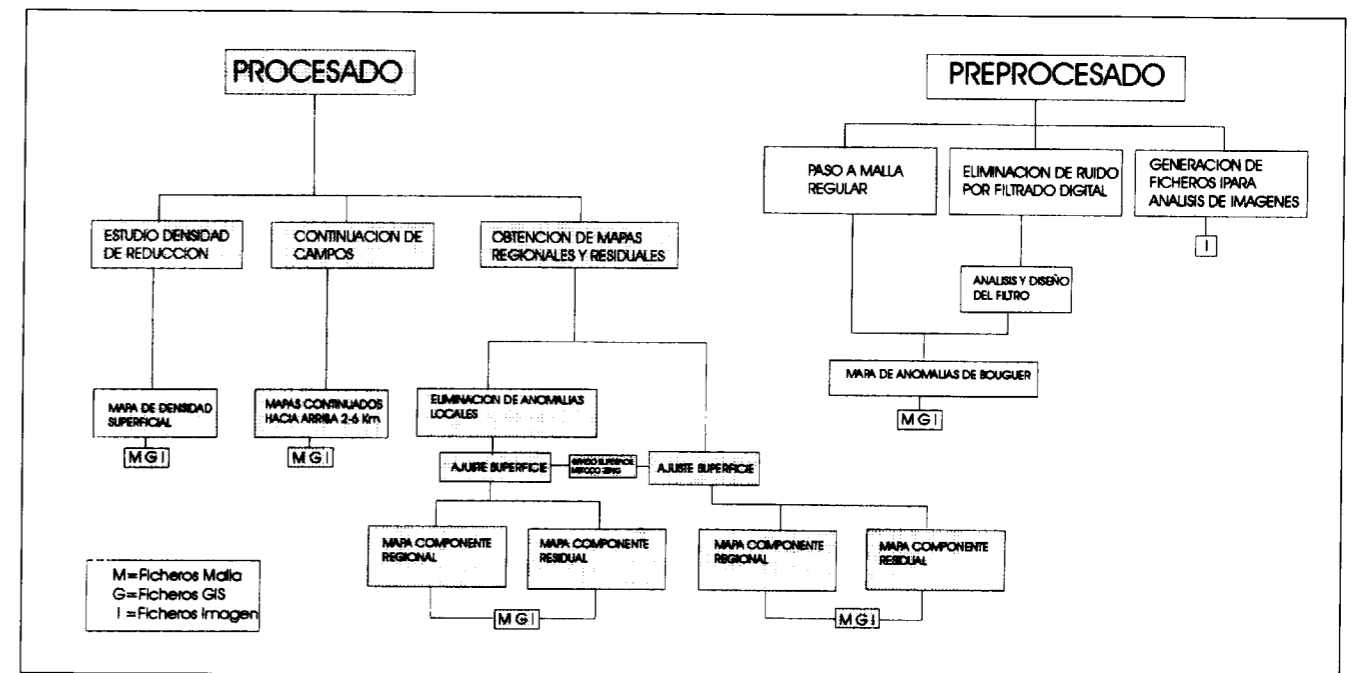
\* **Preparación de las imágenes**, necesarias para el análisis de la correlación de anomalías de Bouguer con la geología y con la topografía.

Los procesos realizados para el análisis de los datos gravimétricos han sido:

- \* **Estudio de la densidad de reducción**, lo que permite obtener además un mapa de densidades superficiales deducido de las anomalías gravimétricas.
- \* **Obtención de las anomalías a diferentes alturas** (continuación de campos) como técnica de análisis de tendencias regionales.
- \* **Obtención de mapas de anomalías regionales y residuales**, base de la interpretación cualitativa y cuantitativa de las anomalías.

Todos los pasos del proceso han sido realizados con un software confeccionado en el área de Geofísica, tanto en la fase de diseño de filtros y filtrado (PABA), análisis de densidad (DENSAD), ajuste de superficies (REGRES) y continuación (EXPCON). Junto con el software de procesado

CUADRO 1  
Esquema General del procesado de datos gravimétricos



ha sido desarrollado simultáneamente un tipo de software imprescindible en las fases complementarias de las distintas etapas de proceso, como son los cambios de formatos de los ficheros de datos y resultados dentro del flujo de datos entre los diferentes programas empleados en el proceso (INTERMA); preparación de salidas gráficas en forma de mapas de isolíneas, preparación de ficheros en forma de imágenes y generación de capas de información en formato de GIS.

Con todos los ficheros de datos y resultados generados durante el procesado de datos, se ha constituido la base de datos de Ficheros de Procesado, FAJA. Esta base está gestionada por el programa KNOSYS de Micronet, que permite el almacenamiento y recuperación de información, toda ella bajo el sistema operativo DOS. La base de datos está constituida por 351 ficheros almacenados la gran mayoría de ellos en formato ASCII, con la excepción de los ficheros de imágenes y sombras que están almacenados en formato binario.

En el esquema general algunos procesos parten de los datos de estaciones gravimétricas de campo y otros parten de los valores en malla. El paso a malla regular es no obstante siempre utilizado en cualquier proceso como fase previa al dibujo de mapas finales.

#### PASO A MALLA REGULAR

Para poder llevar a cabo algunos de los cálculos en las diferentes etapas del proceso, tales como filtrado, trazado de isolíneas, comparación con otros datos, etc., es preciso que los datos se encuentren distribuidos en una malla regular, ya sea cuadrada o rectangular. La realidad es que los datos gravimétricos están medidos normalmente con una distribución irregular, siguiendo los itinerarios posibles dentro de la zona, por lo que un paso necesario es su transformación a valores en malla regular, lo que significa una interpolación y extrapolación de valores sobre los realmente medidos, debiendo procurarse en todo momento que la distorsión producida sobre los datos medidos sea mínima.

Dada la gran irregularidad en la distribución de las estaciones de los datos gravimétricos de la

Faja Pirítica, la obtención de valores en malla regular ha sido objeto de un estudio especial, para poder seleccionar el método de interpolación a utilizar así como el paso de malla a emplear (MARTINEZ, 1994; RUBIO, 1994).

Con este fin se procedió a la comparación de los mallados obtenidos con los distintos programas disponibles en ese momento: Surfer v4.15, UNIMAP (Uniras), CPS (Radian), además de sus distintos métodos de interpolación: Inverso de la distancia, Krigging, Mínima Curvatura, Ajuste por mínimos cuadrados, Snap, Proyección, etc. En este estudio además, se ha evaluado la influencia de la variación de los parámetros de cada programa ( $n^{\circ}$  de puntos de control, radio de búsqueda, refinamientos, etc.), así como las diferencias cualitativas y cuantitativas que se pueden producir al variar no sólo el método sino también el paso de malla, el respeto a los puntos de control, etc.

Para la elección del paso de malla óptimo se han llevado a cabo estudios encaminados a determinar la dimensión fractal de la distribución de puntos y a partir de ella obtener el paso de malla idóneo para esa distribución. También se obtuvo el valor del paso de malla en función de la distancia media entre puntos que existía en la distribución de datos, siendo este último el valor adoptado en el estudio.

Como resultado de este estudio, la malla gravimétrica general de la Faja Pirítica Ibérica se obtuvo con las características generales que se definen en la tabla 2. El mapa de anomalías de Bouguer obtenido con esta malla se representa en la Figura 2a.

En posteriores procesos (filtros digitales en el dominio del espacio) se van a utilizar operadores de  $N \times N$  coeficientes que se convolucionan con los datos en malla, lo que hace perder una banda de información de  $(N-1)/2$  puntos en todos los bordes de la malla; así mismo, el uso de la transformada de Fourier inversa empleado en otras partes de los cálculos a que van a ser sometidos los datos (continuación de campos), distorsiona igualmente los bordes de la zona; por estas razones, a fin de que tras dichos procesos el área resultante con datos útiles sea igual a la definida anteriormente, se ha preparado otra malla

expandida, desplazando el origen 7 km al sur y al oeste, lo que aumenta la matriz en 28 filas y 28 columnas, quedando con las características indicadas en la tabla 2.

TABLA 2  
Datos de la Malla Gravimétrica de la Faja Pirítica

COORDENADAS UTM		$X_{\min}$	$X_{\max}$	$Y_{\min}$	$Y_{\max}$
	NORMAL	630000	749500	4133000	4191500
EXPANDIDA	623000	756500	4126000	4198500	

PASO DE MALLA = 500 m.  
 NUMERO DE FILAS = 118 (NORMAL), 146 (EXPANDIDA)  
 NUMERO DE COLUMNAS = 240 (NORMAL), 268 (EXPANDIDA)  
 METODO DE INTERPOLACION = SNAP (CPS)

#### ELIMINACION DE RUIDO POR FILTRADO DIGITAL

En el mapa de anomalías de Bouguer obtenido a partir de la malla de 500 m x 500 m (Fig 2a), se observan anomalías de muy pequeña extensión, así como una elevada rugosidad en el trazado de las isolíneas. Estas variaciones del mapa pueden tener su origen tanto en causas geológicas (variaciones de densidad de origen muy superficial y local), metrológicas (variaciones en la distancia entre estaciones según la zona, influencia de la topografía) como en el propio cálculo de interpolación para paso a malla y trazado de isolíneas. Para este Proyecto, estas variaciones tan rápidas y puntuales no son de interés, y cualquiera que sea su origen, podemos considerarlas como ruido, por lo que puede procederse a su eliminación mediante la aplicación de filtros digitales.

Para diseñar el filtro a utilizar se han llevado a cabo dos etapas previas:

1/ **Análisis de las características espectrales del mapa**, para deducir las frecuencias que pueden eliminarse.

2/ **Análisis del comportamiento del filtro**, para deducir sus parámetros de aplicación.

1/ **Características espectrales del mapa**: el estudio de las características espectrales se ha hecho sobre perfiles con valores en malla regular, para los que se ha obtenido sus espectros de amplitud, que indican la contribución de los diferentes armónicos a la formación de las anomalías del

perfil. A la vista del mapa de anomalías de Bouguer, los perfiles de dirección norte-sur reflejan mejor el contenido de anomalías residuales, mientras que en los perfiles este-oeste predominan las tendencias regionales. En cualquier dirección, los armónicos de frecuencias superiores a 0.25 c/i (anomalías de anchura inferior a 2 km) sólo contribuyen con valores inferiores al 5%, por lo que pueden ser considerados esencialmente como ruido. Dado que el intervalo entre los datos en malla es de 0.5 km, no existen en los perfiles anomalías de anchura inferior a 1 km.

Para observar mejor la contribución efectiva de cada parte del espectro, se ha procedido a aplicar a los perfiles diferentes filtros pasa baja en el dominio de las frecuencias, suprimiendo los armónicos correspondientes a diferentes frecuencias de corte antes de proceder a efectuar su transformación de Fourier inversa.

En los perfiles filtrados se ha observado que según la dirección, la amortiguación de las anomalías de anchura inferior a 5 km este-oeste (0.1 c/i), y la eliminación de anomalías de anchura inferior a 2 km en dirección norte-sur (0.25 c/i) es capaz de suprimir el ruido sin distorsionar los datos.

2/ **Análisis del filtro a aplicar**: el diseño de la función de transferencia del filtro se ha efectuado por la elección de:

- Una frecuencia de terminación a partir de la cual la contribución de los armónicos queda eliminada o reducida a menos del 20 %.
- Una frecuencia de corte, que es la frecuencia del filtro propiamente dicho, y que define la rampa de amortiguación.
- El número de coeficientes del filtro.

Como consecuencia del análisis efectuado, se ha procedido a diseñar el filtro con frecuencia de corte a 0.1 c/i y frecuencia de terminación a 0.5 c/i, como el más adecuado para el conjunto global de los datos.

La función de transferencia de este filtro está representada en la figura 3, donde está calculada para juegos de coeficientes que van desde matri-

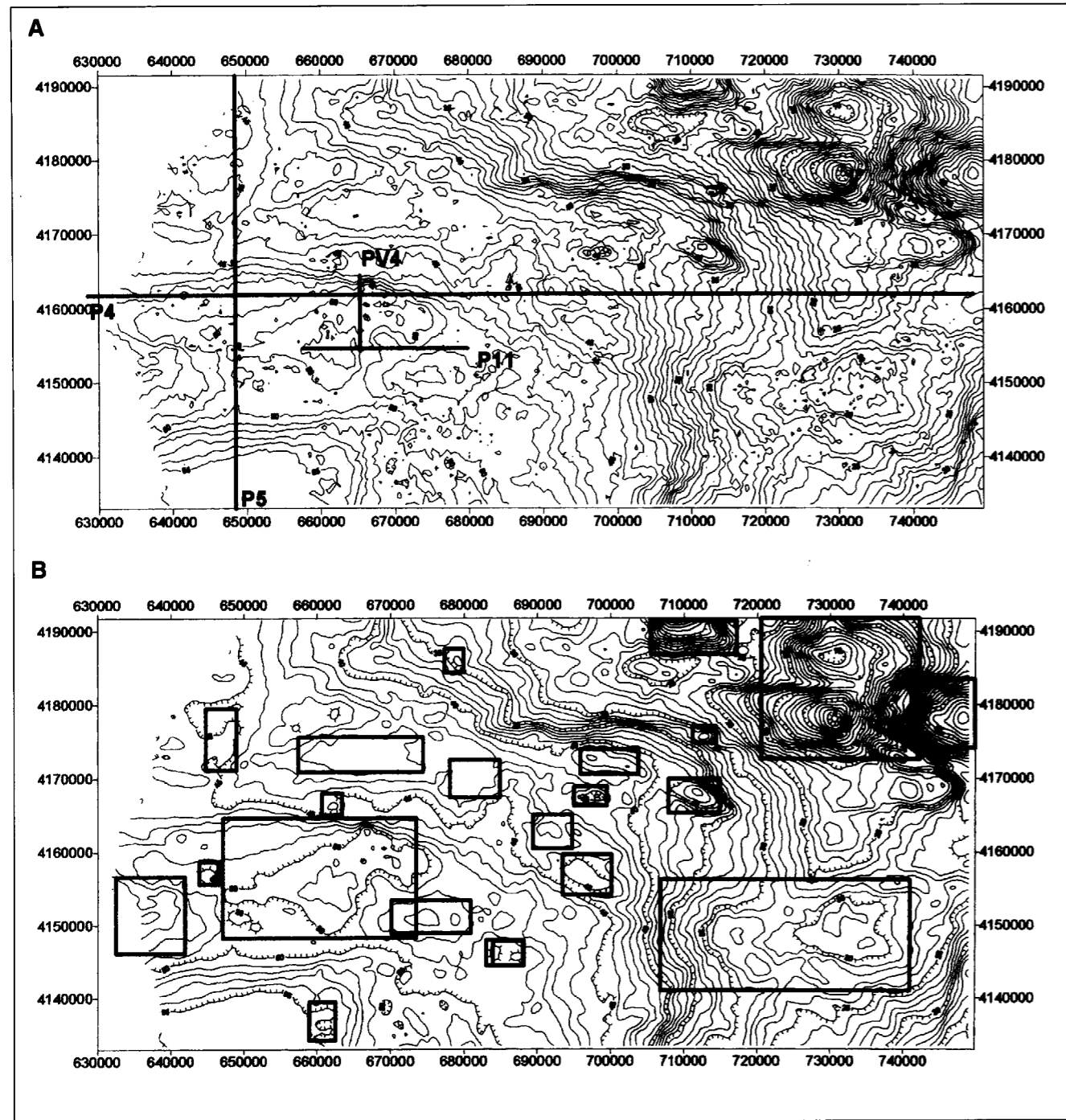


Figura 2a.- Mapa de Anomalías de Bouguer de la Faja Pirítica obtenido por CPS (Snap). Perfiles V4 y P11 de la zona de prueba y P4 y P5 de la Malla total utilizados para determinar las características espectrales del mapa y diseñar el filtro a aplicar. Intervalo entre isolíneas 1 mGal.

Figura 2b.- Mapa de Anomalías de Bouguer, filtrado por PABA con filtro 0.1-0.5 c/i. Se muestran las zonas blanqueadas para la obtención de la componente regional, mediante el método de supresión previa de residuales locales. Intervalo entre isolíneas 1 mGal.

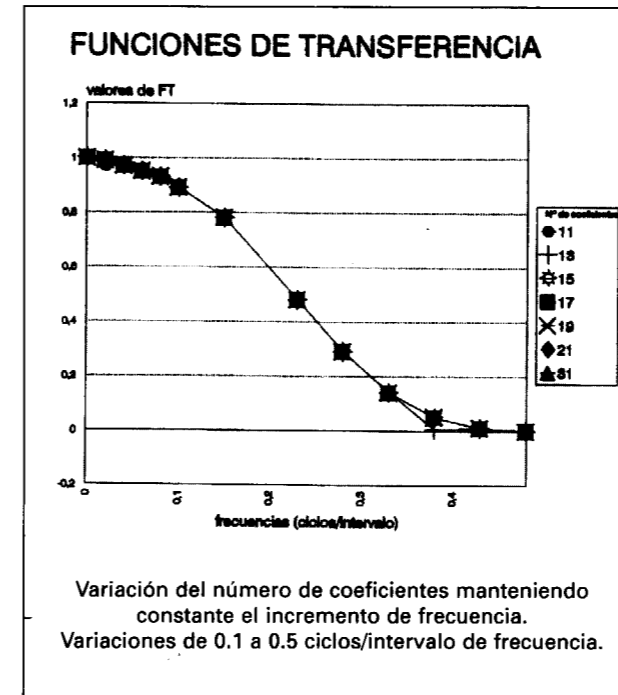


Figura 3.- Funciones de transferencia del filtro en función del número de coeficientes.

ces de 11x11 hasta 31x31, apreciándose la poca variación que se introduce en ellas, sobre todo para más de 15 coeficientes; para perder la menor cantidad de datos en los bordes por efecto de la convolución interesa que el operador del filtro sea lo menor posible, por lo que se han escogido filtros de 15x15 coeficientes.

Debido a las características de la función de transferencia que ha sido aplicada (programa PABA), la utilización de esta frecuencia de filtro no significa que se eliminen totalmente las anomalías de menos de 5 km de anchura, lo que no sería admisible en este contexto geológico, sino que se verán fuertemente amortiguados los componentes de muy alta frecuencia o ruido, a los que es evidente que contribuyen más los armónicos de las anomalías de menor anchura, que no serán sin embargo eliminados, sino suavizados.

Este filtro ha sido aplicado a los valores de anomalías de Bouguer tanto de la malla original como de la malla expandida, resultando nuevas mallas con valores de anomalías filtradas, representados en la Fig. 2b.

ESTUDIO DE LA DENSIDAD DE REDUCCION

En un área tan extensa como la contemplada en este trabajo, y con la diversidad de formaciones geológicas aflorantes, es necesario verificar si la densidad de reducción adoptada para el cálculo de la anomalía de Bouguer es válida en todos los entornos, de forma que no puedan ser mal interpretadas anomalías de probable origen de correlación topográfica. Por otra parte, del cálculo de la densidad de reducción más adecuada en cada lugar se pueden obtener unos mapas de densidad, que proporcionan una información adicional derivada de las medidas gravimétricas, con valor propio en cuanto a documento de interpretación de las estructuras del subsuelo.

El sistema seguido para este cálculo ha sido el descrito en el programa DENSAD (PLATA, 1983): el valor de la anomalía de Bouguer, entendido como diferencia entre un valor de gravedad teórico y otro medido, depende de la densidad adoptada en los cálculos del efecto de la placa de Bouguer; si para un conjunto o muestra de estaciones gravimétricas se efectuaran los cálculos con la densidad "real" (probablemente distinta para cada estación), dichos puntos no definirían una anomalía; en efecto, el valor de la anomalía de Bouguer resulta de una diferencia entre la densidad de reducción y dicha densidad real, que sería la de todas las masas que ejercen su efecto sobre esas estaciones, incluida la masa anómala. Si el conjunto de estaciones no define ninguna anomalía local, podrá calcularse la densidad de reducción que haga que el valor de la anomalía de Bouguer defina una componente de regional plana, ya que cualquier regional puede definirse o aproximarse por un conjunto de "escamas" planas. Si el conjunto de estaciones define una anomalía local, el pretender ajustar un plano a dicha anomalía dará como resultado una falsa densidad de reducción. Es evidente que el plano regional y por tanto la densidad resultado del cálculo, depende de la extensión geográfica del conjunto de estaciones, de acuerdo con la distancia entre ellas.

Para realizar los cálculos, es preciso conocer:

- \* Los valores X, Y, Z, G, GN, T (coordenadas, cota, gravedad medida, gravedad normal y corrección topográfica) de cada estación.

- \* El origen  $X_0, Y_0$  de la primera muestra a tomar.
- \* El radio de la muestra  $R$ .
- \* El paso de avance del muestro  $dX, dY$ .

La primera muestra está formada por las  $N$  estaciones que se encuentren en un círculo de centro  $X_0, Y_0$  y radio  $R$ , calculándose para ese conjunto de estaciones la densidad de reducción  $D$  que hace que la anomalía de Bouguer se ajuste mejor a un plano. El centro de la muestra se desplaza al punto  $X_0+dX, Y_0$ , realizando la misma operación, recorriendo así toda la zona.

Como resultado del cálculo, se obtienen los valores  $X, Y, D, N$  de cada muestra, así como la distribución por intervalos seleccionados de las densidades en los rangos solicitados.

A fin de ajustar los parámetros de proceso, se han realizado previamente unos ensayos sobre una zona restringida, variando el paso de muestreo  $dX=dY$  y el radio  $R$ . Del resultado de estos ensayos se han elegido los parámetros de

$R=2000$  m,  $dX=dY=1000$  m como los más adecuados para este área gravimétrica, lo que supone por tanto aceptar dos hipótesis:

a) Al utilizar un radio de muestra de 2000 m serán consideradas anomalías locales en este proceso las de menos de 4 km de anchura; cuando todos o gran parte de los puntos de una muestra definan tales anomalías, los resultados obtenidos de densidad carecen de significado.

b) Dado un paso de muestreo de 1000 m, las formaciones geológicas de anchura inferior a 2000 m no se verán forzosamente representadas en el mapa de densidades.

Aplicado a todo el conjunto de la Faja Pirítica, el mapa de densidades obtenido es el representado en la figura 4, donde además, como ejemplo de la información que este mapa puede proporcionar, se ha superpuesto el contorno de los afloramientos terciarios, apreciándose una buena coincidencia con los resultados de la distribución de densidades.

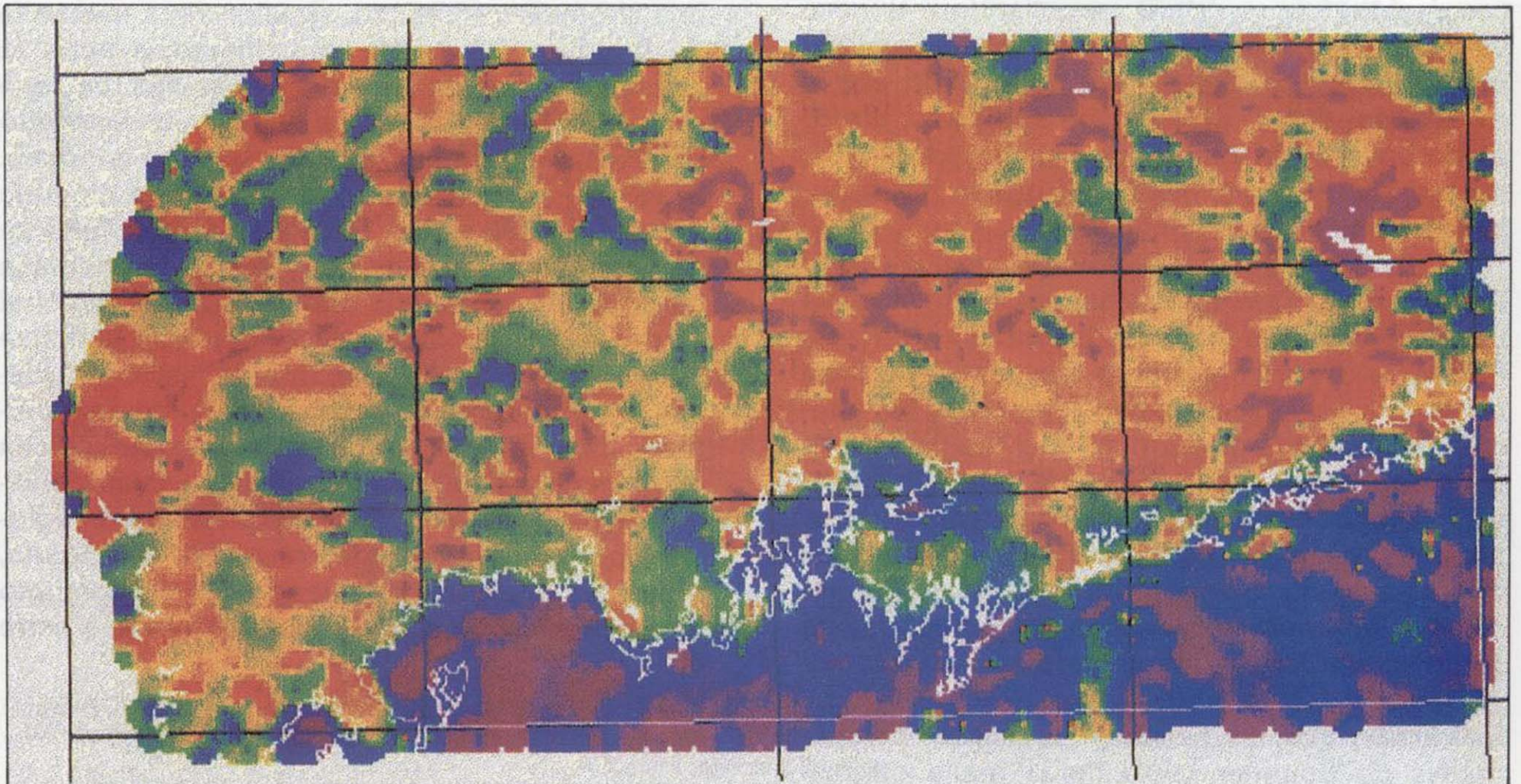


Figura 4.- Mapa de densidad de reducción obtenido con el proceso DENSAD, para  $R=2000$ m,  $dx=dy=1000$ m. En él se ha superpuesto el contorno de los afloramientos terciarios para apreciar la información que este tipo de mapas puede proporcionar.

- \* El origen  $X_0, Y_0$  de la primera muestra a tomar.
- \* El radio de la muestra  $R$ .
- \* El paso de avance del muestro  $dX, dY$ .

La primera muestra está formada por las  $N$  estaciones que se encuentren en un círculo de centro  $X_0, Y_0$  y radio  $R$ , calculándose para ese conjunto de estaciones la densidad de reducción  $D$  que hace que la anomalía de Bouguer se ajuste mejor a un plano. El centro de la muestra se desplaza al punto  $X_0+dX, Y_0$ , realizando la misma operación, recorriendo así toda la zona.

Como resultado del cálculo, se obtienen los valores  $X, Y, D, N$  de cada muestra, así como la distribución por intervalos seleccionados de las densidades en los rangos solicitados.

A fin de ajustar los parámetros de proceso, se han realizado previamente unos ensayos sobre una zona restringida, variando el paso de muestreo  $dX=dY$  y el radio  $R$ . Del resultado de estos ensayos se han elegido los parámetros de

$R=2000$  m,  $dX=dY=1000$  m como los más adecuados para este área gravimétrica, lo que supone por tanto aceptar dos hipótesis:

a) Al utilizar un radio de muestra de 2000 m serán consideradas anomalías locales en este proceso las de menos de 4 km de anchura; cuando todos o gran parte de los puntos de una muestra definan tales anomalías, los resultados obtenidos de densidad carecen de significado.

b) Dado un paso de muestreo de 1000 m, las formaciones geológicas de anchura inferior a 2000 m no se verán forzosamente representadas en el mapa de densidades.

Aplicado a todo el conjunto de la Faja Pirítica, el mapa de densidades obtenido es el representado en la figura 4, donde además, como ejemplo de la información que este mapa puede proporcionar, se ha superpuesto el contorno de los afloramientos terciarios, apreciándose una buena coincidencia con los resultados de la distribución de densidades.



Figura 4 Mapa de densidad de reducción obtenido con el proceso DENSAD, para  $R=2000$ m,  $dx=dy=1000$ m. En él se ha superpuesto el contorno de los afloramientos terciarios para apreciar la información que este tipo de mapas puede proporcionar.

## CONTINUACION DE CAMPOS

La continuación de campos consiste en determinar el valor de las anomalías a una altura  $z_1$ , a partir de medidas realizadas a una altura  $z$ ; cuando  $z_1 > z$  se denomina continuación hacia arriba, en caso contrario se denomina continuación hacia abajo (SHERIFF, 1993).

La intensidad y amplitud de una anomalía es función de la distancia a la fuente que la origina. Por tanto un mapa de anomalías calculado para una altura por encima de la superficie, aparecerá más desprovisto de anomalías debidas a causas superficiales cuanto mayor sea la altura de cálculo. Por el contrario, si los cálculos se hacen a cotas por debajo de la superficie de medición, se acentuarán las anomalías de causas más superficiales.

Para el cálculo de la continuación se ha partido de los valores de la malla gravimétrica expandida (a fin de minimizar las distorsiones que el proceso introduce en los bordes) y filtrada, habiéndose obtenido las continuaciones hacia arriba a 2, 4, 5 y 6 km, que serán utilizados en fases posteriores del proceso; en la figura 5 se representan los mapas de valores continuados a 2 y 5 km.

## OBTENCION DE REGIONALES

El mapa de anomalías de Bouguer refleja de forma conjunta las anomalías producidas por muy diversas fuentes. Para realizar la interpretación del mapa gravimétrico se suele éste separar en dos: el mapa de componentes regionales y el mapa de componentes residuales, siendo su definición una función de la escala elegida y de la profundidad de las masas. En la literatura geofísica existen numerosos métodos de obtener la separación regional-residual del mapa gravimétrico; en este trabajo, como consecuencia de los estudios auxiliares que se han llevado a cabo dentro de este Proyecto y con anterioridad al mismo, se ha seguido el método de ajuste de superficies complementado a través de dos etapas previas.

La esencia del método consiste en suponer que el valor de anomalía de Bouguer producido por las masas más profundas y/o extensas, forman una

función de variación suave, representable analíticamente por ajuste a los valores regionales de una superficie de un determinado grado, generalmente pequeño; este ajuste puede realizarse por métodos de cálculo ordinario como es el de mínimos cuadrados. El problema estriba en que al ajustar una función a la anomalía de Bouguer completa (regional + residual), que es de lo que se dispone, las anomalías residuales locales distorsionan el ajuste, por lo que en este proceso se ha seguido el método de definir previamente dichas anomalías y eliminarlas del Bouguer antes de ajustar una superficie.

Por otra parte, existe una incertidumbre en cuanto al grado de la función que debe ajustarse a los valores de la anomalía: para ello se ha utilizado una técnica, propuesta por ZENG (1989) que consiste en el análisis de las continuaciones del Bouguer a distintas alturas.

a) Determinación del grado por análisis de continuaciones.

Este método se basa en que al efectuar la continuación hacia arriba, las componentes residuales sufren una amortiguación mucho más fuerte que las regionales, de tal forma que a partir de una determinada altura de continuación, el mapa obtenido no sufre prácticamente variación y puede ser representado por una función analítica, resultado de un ajuste polinómico a los valores continuados. Una función del mismo grado representará a las componentes regionales a la cota de las mediciones sobre el terreno.

Para la determinación del grado de una función que represente la componente regional se ha procedido por tanto de la manera siguiente: a partir de la malla filtrada se han obtenido los mapas de continuación de la malla gravimétrica desde 2 km hasta 7 km con incremento de 500 m; se han comparado estos planos para ver a partir de cual la variación con el siguiente era mínima, tomando ese mapa como el representativo de las anomalías de origen más profundo (regional); este mapa resultó ser el continuado a 4 km.

A este mapa continuado se le han ajustado superficies de grado variable desde 1 a 6, calculando el error cuadrático medio del ajuste en

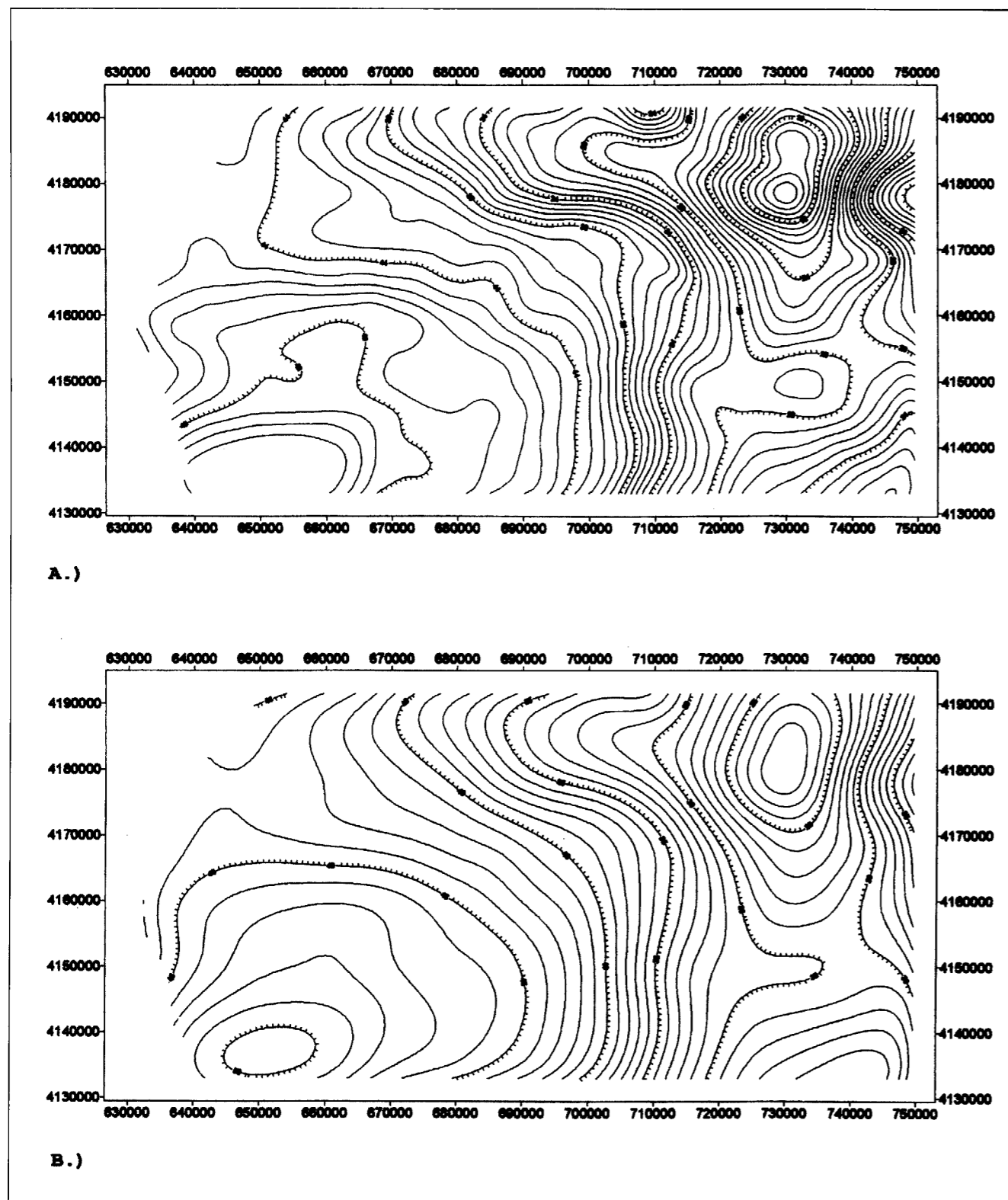


Figura 5.- Mapas Gravimétricos continuados hacia arriba 2 km (A) y 5 km (B). Intervalo entre isólinas 1 mGal en ambos.

todas ellas. Con los valores del grado de la superficie en abcisas y error de ajuste en ordenadas se ha confeccionado un gráfico, (figura 6), donde se observa que el cambio de tendencia de la curva obtenida, corresponde con la superficie de ajuste de 4º grado, siendo ésta la óptima según ZENG.

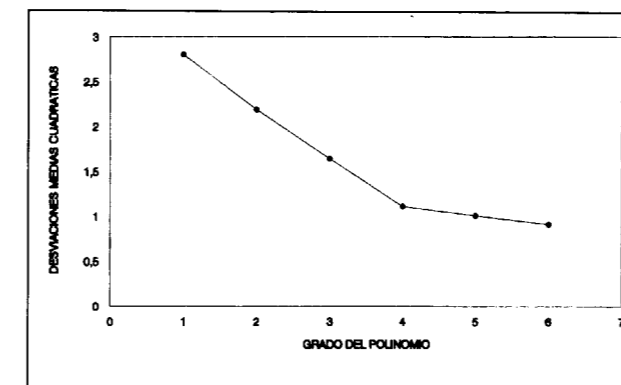


Figura 6.- Gráfico para la obtención del grado óptimo de la superficie de ajuste según ZENG. En abcisas se muestran los grados de las superficies que se ajustan al mapa continuado 4 km, y en ordenadas los errores de estos ajustes, el cambio de tendencia corresponde con el grado óptimo de ajuste.

b) Ajuste de superficies con supresión previa de residuales locales.

Este método de obtención de la regional, ha sido puesto a punto expresamente para este Proyecto (CORTIJO, 1994) en el Area de Geofísica del ITGE; está basado en la filosofía de qué es necesario conocer o poseer un criterio de qué es lo que se considera como residual local en cada zona a estudiar. En base a esto el método consiste en eliminar del mapa de anomalías de Bouguer todas aquellas estaciones que el interpretador considere que definen anomalías residuales locales, para posteriormente ajustar una superficie a los puntos no eliminados, evitando el efecto de que los valores de las residuales locales influyan en la superficie ajustada.

Se han seleccionado en el mapa de Bouguer las áreas que definen las anomalías locales, según se indica en la fig. 2b, eliminando del fichero de datos de campo las estaciones gravimétricas comprendidas en dichas áreas, ajustando a las estaciones restantes una superficie de 4º Grado, que es el deducido en la etapa anterior, efectuando posteriormente su paso a valores en

mapa regular. Esta malla ha sido posteriormente filtrada. En las figuras 7a y b, se observan los mapas obtenidos para las componentes regional y residual.

La diferencia entre suprimir o no las anomalías locales como fase previa al ajuste de una superficie, es más de orden cuantitativo que cualitativo, como puede observarse por comparación de los mapas de regional obtenidos de ambas formas, en la figura 8.

## CONCLUSIONES

El ITGE ha finalizado recientemente un proyecto multidisciplinario, sobre un área que abarca unos 6000 km<sup>2</sup> dentro de la denominada Faja Pirítica, con el objetivo de revisar el conocimiento geológico existente. En el marco de este proyecto el Area de Geofísica del ITGE, ha llevado a cabo un importante trabajo de desarrollo metodológico, para la explotación de datos gravimétricos y magnéticos de gran cobertura. En este artículo se describe el esquema de preprocesado y procesado adoptado con los datos gravimétricos de que se disponía en la Faja Pirítica: paso a malla regular, filtrado, continuación de campos, análisis de densidad de reducción y separación regional-residual. También se indican los diversos estudios realizados, con el fin de automatizar, optimizar, diseñar y poner a punto la metodología empleada en cada una de estas fases del proyecto. Se ha empleado para todo ello un software desarrollado por la propia Area de Geofísica, tanto en los aspectos del procesado en sí como en todas las labores complementarias (cambio de formato, ordenación de datos, etc.); con todos los ficheros generados se ha creado una base de datos, donde se almacenan los datos en ficheros de mallas, imágenes y como capas de Arc/Info. El resultado final del proceso es la obtención de los documentos sobre los que realizar la interpretación de los datos geofísicos.

## REFERENCIAS

ADARO, GEXSA, ITGE (1992). "Gravimetría estructural en la Faja de Minerales Piríticos del SO de España". Fondo documental del ITGE nº 40415

CORTIJO (1994). "Influencia de la regionalización en la interpretación cuantitativa de campos potenciales, con modelos



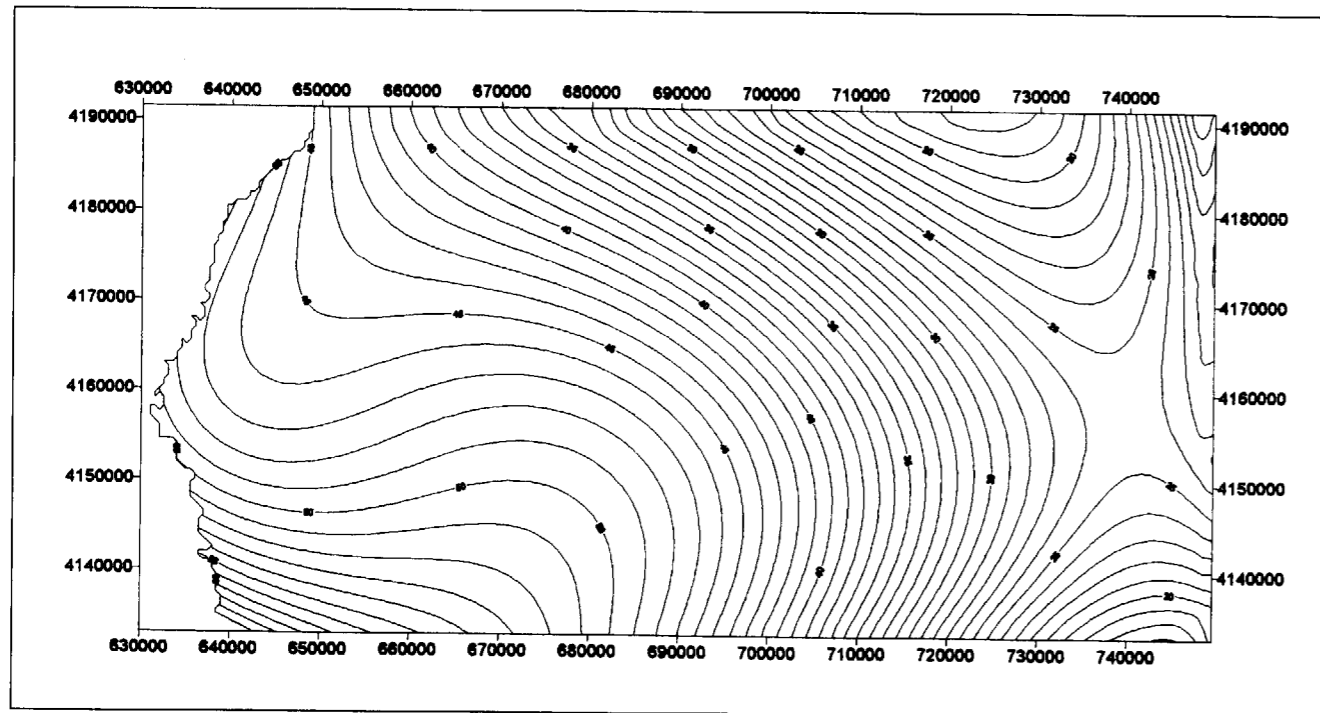


Figura 7a.- Mapa de componente regional, obtenido aplicando la metodología de la eliminación previa de las anomalías residuales locales señaladas en el figura 2b. El mapa está representado con un intervalo entre isolíneas de 1 mGal.

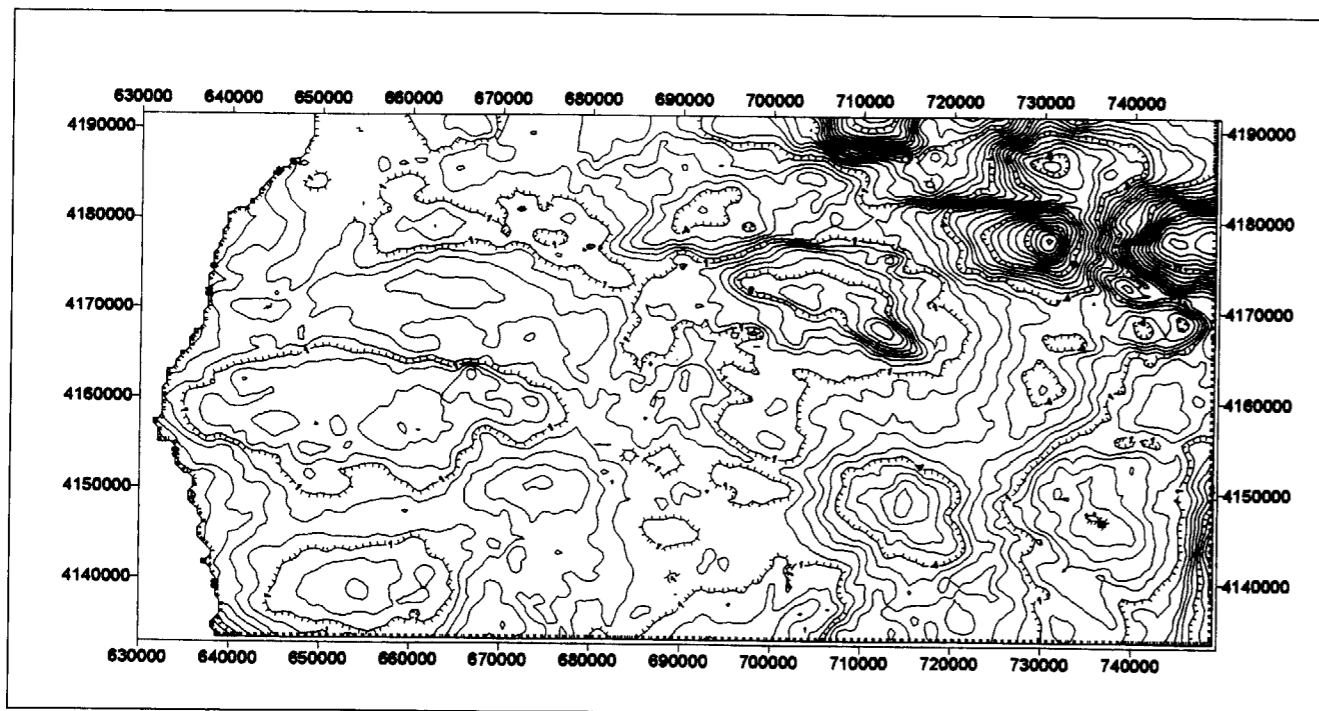


Figura 7b.- Mapa de componente residual, obtenido aplicando la metodología de la eliminación previa de las anomalías residuales locales señaladas en el figura 2b. El mapa está representado con un intervalo entre isolíneas de 1 mGal.

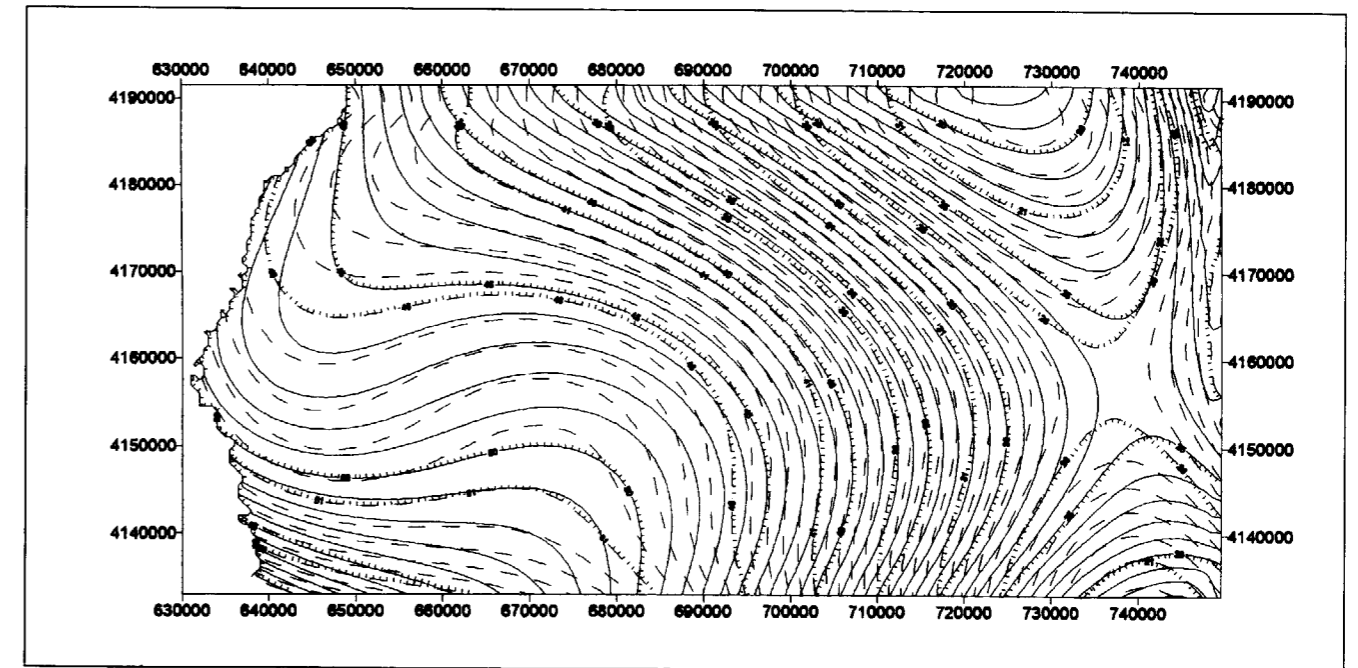


Figura 8.- Comparación de los mapas gravimétricos regionales obtenidos mediante eliminación de anomalías (lleno) y análisis de continuaciones (trazos). Intervalo entre isolíneas 1 mGal.

2D y 3D. Aplicación a la Faja Pirítica Ibérica". Documento interno Area Geofísica ITGE n° 477

I. T. G. E. (1995). "Proyecto Integrado de estudio geológico y metalogénico de la Faja Pirítica. Geofísica, Parte 1: Proceso de datos e Interpretación cualitativa". Fondo documental del ITGE n° 40455

LAVIN, DEVANE (1970). "Direct design of two dimensional digital wavenumber filters" *Geophysics* 35, pp. 1073-1078

MARTINEZ (1994). "Interpretación geofísica cuantitativa: desarrollo de una metodología para problemas minero estructurales". Documento interno Area Geofísica ITGE n° 473.

OLMO, PLATA (1984-1994). Programa REGRES. Informe interno Area Geofísica ITGE Base de programas informáticos, manual G4.

PLATA (1976). Programa EXPCON. Informe interno Area Geofísica ITGE Base de programas informáticos, manual G5.

PLATA (1983). "Nuevo método de cálculo de la densidad de reducción en gravimetría" (programa DENSAD). *Boletín Geológico y Minero T XCIV-VI* pp 510-520.

PLATA (1993). Programa CAMDEN. Informe interno Area Geofísica ITGE Base de programas informáticos, manual G3.

PLATA (1993). Programa PERFIL. Informe interno Area Geofísica ITGE Base de programas informáticos, manual G3.

PLATA (1993). Programa MALLA. Informe interno Area Geofísica ITGE Base de programas informáticos, manual G16.

PLATA (1994). Programa BLAN. Informe interno Area Geofísica ITGE Base de programas informáticos, manual G4.

PLATA (1995). Programa INTERMA. Informe interno Area Geofísica ITGE Base de programas informáticos, manual G22.

PLATA, GARCIA LOBON (1985). Programa FFTGR. Informe interno Area Geofísica ITGE Base de programas informáticos, manual G4.

PLATA, GARCIA LOBON (1985). "Tendencias actuales para tratamiento de datos gravimétricos: aplicación de un sistema desarrollado por el IGME" (programa PABA). *Boletín Geológico y Minero T XCVI-IV* pp 413-423.

ROBINSON (1979). "Filtan, a fortran program for one dimensional Fourier transform". *Computers & Geosciences* vol.5 pp. 231-249.

RUBIO (1994). "Estudio de los programas de mallado. Elección del paso de malla mediante análisis fractal". Documento interno Area Geofísica ITGE n° 485.

SHERIFF (1993). *Diccionario Enciclopédico de términos geofísicos*.

ZENG (1989) "Estimation of the degree of polynomial fitted to gravity anomalies and its application" *Geophysical Prospecting* 37 pp 959-973.

Original recibido: Octubre 1997.

Original aceptado: Marzo 1998.

## ESTUDIOS SOBRE LA ISOSTASIA EN CUBA: UNA CARACTERIZACION Y DELIMITACION DE ZONAS POTENCIALMENTE SISMICAS.

Por J. L. CUEVAS OJEDA (\*)

### R E S U M E N

En el trabajo se presenta un conjunto de resultados todos relacionados con los estudios que sobre isostasia en Cuba se han realizado hasta la actualidad por el autor.

En el mismo se expone el mapa de anomalías isostáticas residuales (AIR) de Cuba centro oriental, basado en el modelo de Airy-Heiskanen de compensación isostática local. La característica más notable de este mapa se encuentra en la región oriental del país, donde se observan altos valores positivos de las anomalías. Se discute, teniendo en cuenta otros datos geólogos-geofísicos y sismológicos, una posible naturaleza de las anomalías, determinándose la existencia de macrobloques y bloques isostáticos. Por otra parte, se calculó el espesor isostático de la corteza terrestre en la región, haciéndose un análisis de la función de compensación isostática de la corteza teniendo en cuenta las anomalías de Bouguer y el método de las ondas de cambio de los terremotos.

El estudio de las relaciones entre isostasia y la sismicidad aportó un mayor grado de conocimiento sobre la estructura profunda de la corteza y sus aplicaciones en la actividad tectónica, relacionada directamente con la sismicidad. Los principales resultados fueron la caracterización isostática de las zonas sismogeneradoras (ZSG) y un esquema de zonación de las magnitudes máximas ( $M_{max}$ ) donde se delimitan 17 zonas potencialmente sísmicas. Además se obtuvieron relaciones experimentales entre las AIR y las  $M_{max}$  calculándose mapas de la distribución espacial de las  $M_{max}$  del terremoto máximo posible, lo que contribuye activamente a la solución del complejo problema de la determinación de las  $M_{max}$ , a partir de la información geofísica.

Todos los aspectos tratados en el presente trabajo constituyen en si novedades utilizadas por primera vez en Cuba dentro de las investigaciones geólogo-geofísicas, siendo aplicados en trabajos sismológicos complejos en objetivos económico-sociales (CEN Juraguá y Taller IX -Depósito de desechos nucleares-).

*Palabras clave:* Isostasia, Anomalías isostáticas, Sismicidad, Zonas simogeneradoras, Magnitudes máximas, Cuba.

### A B S T R A C T

In this paper, results all related with the studies about isostasy in Cuba that has been carried out by the author are presented.

The isostatic residual gravity map (IRG) is exposed for mid eastern part of Cuba, based on Airy-Heiskanen local compensation model. The most notable characteristic of this map meets in the oriental region of the country, where high positives values of anomalies are observed. Taking into account, other geological, geophysical and seismological data, a possible nature of the anomalies is discussed, determining the existence of isostatic blocks. On the other hand, the isostatic crustal thickness was calculated in the region. An analysis of its function of isostatic gravity compensation, taking into account, the Bouguer gravity anomaly map with terrain corrections (until 167 km) and the conversion waves of the earthquakes method is discussed.

The study of the relationships between isostasy and seismicity contributed to increase the knowledge about deep crustal structure and their implications in tectonic activity, directly related with seismicity. The main results were the isostatics characterization of the seismogenic zones (SGZ) and a maximal magnitudes ( $M_{max}$ ) zones's scheme, where 17 potential seismic zones are defined. They were also gotten experimental relationships between the IRGand the  $M_{max}$ , calculating maps of the space dis-

(\*) Instituto de Geofísica y Astronomía, calle 212 N° 2906 e/ 29 y 31, La Lisa, C, Habana, CP11600, Cuba.

tribution of the  $M_{max}$  of the maximal possible earthquake, the one which contributes actively to the solution of the complex problem to determine the  $M_{max}$ , from the geophysical information.

All aspects presented in this paper are novelties utilized by first time in Cuba within geological and geophysical researches, being applied in seismological complex studies for social and economical constructions as Juraguá Nuclear Power Plant and residual waste place.

**Key words:** Isostasy, Isostatic anomalies, Seismicity, Seismogenic zones, Maximal magnitudes, Cuba.

## INTRODUCCION

Desde hace muchos años, después que AIRY y PRATT en 1855 introdujeron el concepto del necesario balance en la corteza terrestre y el término isostasia fue propuesto, mucho se ha trabajado en el mundo con el objetivo de establecer la existencia del equilibrio isostático, de estudiar la naturaleza de los mecanismos de la isostasia, de determinar cual modelo de compensación isostática se adecúa mejor a una u otra región. Los estudios complejos en las regiones de actividad tectónica exigen la información de diferentes métodos geofísicos y geológicos para poder caracterizar los procesos tectónicos profundos. Desde este punto de vista, la isostasia se toma un indicador de la actividad tectónica de una región, así como los movimientos tectónicos recientes, las anomalías del flujo calórico, el vulcanismo y la sismicidad.

En Cuba este tipo de estudios fue iniciado por compañías norteamericanas en 1940 cuando las observaciones gravimétricas pendulares realizadas hasta ese momento fueron reducidas sobre la base de las hipótesis isostáticas en un trabajo titulado "Reduction of Gravity-meter to Isostatic Basis", referido en un estudio especial para valorar la influencia isostática en el área de El Santo, en Santa Clara (McCOLLUM, 1940). Durante la década del 70, tenemos referencias de algunos trabajos realizados por S. IPATENKO (J. L. Prol. comun. pers.), aunque no concluidos. Posteriormente no se encaminaron esfuerzos en la dirección de confeccionar un mapa que describiera el campo gravimétrico sobre la base de la isostasia en Cuba. Es precisamente en el año 1986 en que el Instituto de Geofísica y Astronomía comienza a trabajar paulatinamente en la dirección de la construcción de un mapa gravimétrico sobre la base de cálculo del efecto isostático de las masas de compensación y así

también poder establecer las relaciones entre las anomalías isostáticas y la sismicidad que para el caso de Cuba resultó de interés.

Partiendo de estas premisas se puede plantear que a partir del momento en que el estudio del fenómeno se hace sistemático, el mismo ha transitado desde entonces en primer lugar por la elaboración del software de cálculo de la corrección isostática, una posterior preparación de la información gravitacional, teniendo en cuenta la hipótesis de Airy-Heiskanen, la descripción e interpretación cualitativa de esta información para el estudio profundo de la corteza terrestre, incluyendo su función de compensación isostática y su consecuente relación con la actividad tectónica, expresada ésta en su mayor manifestación: la sismicidad.

En la presente investigación se abordarán todos los aspectos tratados en los estudios isostáticos en Cuba, centrándose de manera especial, la atención en la caracterización isostática de las Zonas Sismogeneradoras (ZSG), utilizando la información gravitacional en términos de la distribución espacial del gradiente horizontal máximo (GHM) de las Anomalías Isostáticas Residuales (AIR). De esta forma se puede establecer la posibilidad de utilizar una información geofísica para las investigaciones sismológicas que se llevan a cabo para la ubicación de importantes objetivos de interés económico-social, siendo un aspecto de gran ayuda y esclarecimiento, en la compleja labor de la determinación de las  $M_{max}$  de los terremotos, siendo su aplicación menos costosa que otros métodos que son incluidos en los estudios sismológicos, sin pretender sustituirlos. Una condición para su aplicación e implementación, sobre todo en países donde la información sismológica puede ser pobre, ya que por lo general existe información gravimétrica a partir de los trabajos de prospec-

ción gasopetrolífera y de otros minerales sólidos que realizan empresas nacionales y extranjeras. Es por ello, que al estudio de la caracterización y delimitación de Zonas Potencialmente Sísmicas (ZPS), mediante la estimación de las  $M_{max}$  de los terremotos en Cuba, en el ejemplo de su parte centro oriental, se le dedicó atención, con el propósito de aplicar los resultados que sobre las relaciones entre los fenómenos isostáticos y la sismicidad se han venido realizando, aplicados por primera vez en Cuba dentro del complejo de investigaciones sismológicas para objetivos de interés económico social (GONZALEZ et. al., 1994).

## CAMPO GRAVITACIONAL EN REDUCCION ISOSTATICA Y SU GRADIENTE.

**Preparación del Mapa de Anomalías Isostáticas Residuales y su gradiente.** La elaboración de un mapa de AIR se llevó a cabo por CUEVAS (1994), teniendo en cuenta la influencia gravitacional

tanto de las masas topográficas, como de las de compensación hasta una distancia de 166,7 km. - Zona de Hayford  $O_2$ - utilizando el procedimiento descrito por ARTEMJEV (1975) y combinándolo con el campo regional para la atracción topoisostática desde la zona de Hayford  $O_2$  hasta una distancia de  $180^\circ$  grados, sobre una tierra esférica publicado por KARKI et. al. (1961). Este efecto combinado fue adicionado a las anomalías de aire libre convenientemente calculadas a partir de las anomalías de Bouguer (CUEVAS et. al., 1989) en la zona estudiada.

La información contenida en el mapa de anomalías isostáticas residuales (Fig. 1) fue transformada con el objetivo de hallar el gradiente horizontal máximo (VALEK, 1972), el cual es utilizado para valorar la correspondencia de un índice isostático con la actividad sísmica, aspecto este que se discutirá posteriormente. Un detalle mayor sobre la elaboración de este tipo de mapa y su gradiente (GHM), ha sido dada por CUEVAS (1994).

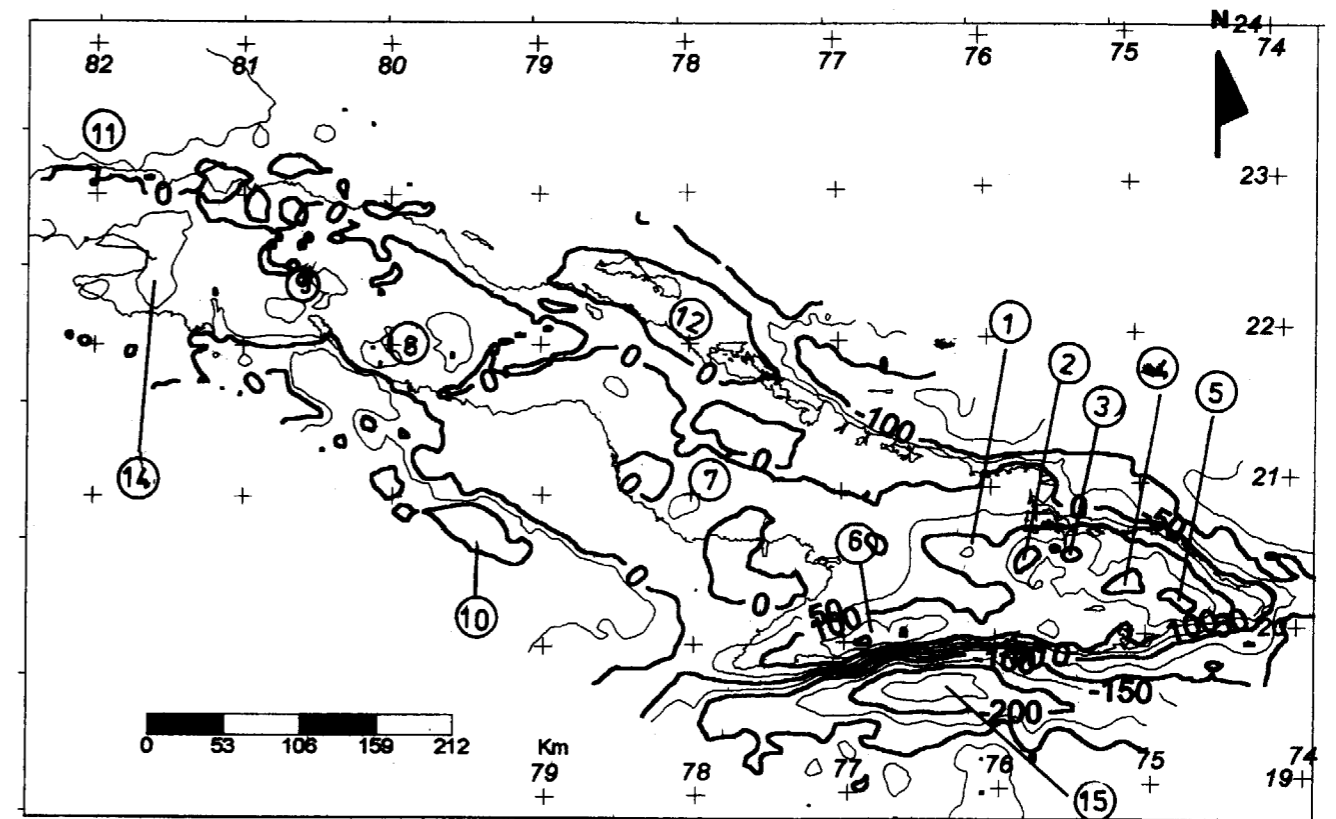


Fig. 1. Mapa de Anomalías Isostáticas Residuales (AIR) de Cuba centro oriental. Sección de isonómalas 50 mGal.

### Caracterización de las principales anomalías isostáticas.

Mediante el proceso antes descrito se obtuvo el mapa de AIR de la región de Cuba centro oriental a escala 1:500.000 (CUEVAS, 1994). En la Fig. 1 se observa como característica principal la diferenciación entre los altos valores de las anomalías en la zona oriental del país y la zona central con valores menores.

En la Tabla 1 se resumen las denominaciones realizadas en el presente trabajo de las anomalías isostáticas y el valor máximo o mínimo a que éstas alcanzan. El fenómeno de las fuertes anomalías en la zona oriental, no se observa en el resto de las anomalías antes descritas, aunque para hablar del desequilibrio isostático se hace necesario observar otros fenómenos como puede ser la actividad sísmica de la zona y que es en la parte sur de la Sierra Maestra y Santiago de Cuba donde se concentra la mayor cantidad de epicentros de terremotos, los que pudieran estar relacionados con ajustes isostáticos.

Téngase en cuenta que con los datos gravimétricos regionales de anomalías de Bouguer totales con que se cuenta en la actualidad (CUEVAS, 1994), sobre la Sierra Maestra se observan valores substanciales positivos hasta 230 mGal, lo que habla de masas de alta densidad que no deben estar compensadas isostáticamente, ya que teóricamente sobre un sistema montañoso las anomalías de Bouguer deben ser negativas. Lo antes planteado no es un punto de llegada, sino que constituye uno de partida para las investigaciones que estamos llevando a cabo en el estudio de la isostasia en la región de Cuba centro oriental.

Sobre la naturaleza de algunas de las anomalías antes mencionadas discutiremos de forma preliminar a continuación.

### Algunas consideraciones sobre la posible naturaleza de las anomalías isostáticas.

Según las características de las anomalías isostáticas (Fig. 1) la región bajo estudio pudiera dividirse en dos secciones, la región oriental que se destaca por sus diferenciados valores anómalos

Tabla 1 Relación de las principales anomalías isostáticas residuales en la región de Cuba centro oriental.

No.	Nombre de la anomalía	Anomalia Isostática Mínima	Máxima	Amplitud (mGal)
1	Levingstone		X	150
2	Moa-Nicaró		X	230
3	Sierra Cristal		X	230
4	Yateras		X	230
5	Sabana La Mar		X	210
6	Sierra Maestra		X	200
7	Caoba-Santa Cruz		X	60
8	Escambray		X	80
9	Cienfuegos		X	60
10	Sur Cubana			-120
11	Norte Habana-Matanzas	X		-80
12	Punta Alegre		X	30
13	Nuevitas-Cabo Lucrecia	X		-150
14	Zapata		X	60
15	Fosa Oriente	X		-260
16	Ana María		X	40-50

y la región central caracterizada por valores relativamente mucho más bajos (las anomalías positivas) que las de la zona más oriental.

La zona oriental posee los valores más altos del país. Aquí puede hacerse una diferenciación entre dos macrobloques isostáticos, uno correspondiente a la zona Nipe-Cristal-Baracoa (N-NE de la región oriental) y el otro a la zona de la Sierra Maestra (S-SO de la misma región). La separación de estas dos zonas puede distinguirse muy bien, en la continuación analítica ascendente (CAA) a un nivel de 50 km. Los altos valores de las anomalías isostáticas infieren sobre el defecto de compensación existente, lo que implica que la superficie de nivel isostático (equivalente al espesor isostático  $H_{iso}$ ) está por debajo del límite corteza-manto  $H_m$ , de ahí que deben estar produciendo esfuerzos tectónicos verticales. Otros investigadores se han referido a los movimientos ascendentes del llamado Anticlinal Oriental (COBIELLA, 1983) por datos de tipo geológico, coincide con lo que hemos denominado aquí macrobloque isostático Nipe-Cristal-Baracoa (MBNCB), que coincidente con la unidad neotectónica homónima y que según el criterio de COTILLA et. al. (1990) es una estructura tipo horst que ha mantenido una gran movilidad y una tendencia general al levantamiento desde el Eoceno Superior hasta el reciente. Los datos que aquí aportamos desde el punto de vista isostático reafirman estas aseveraciones geológicas; otros datos de movimientos recientes de la corteza terrestre en la región oriental también apuntan hacia movimientos verticales de este isostática

con respecto a la Sierra Maestra (MARQUES y CALVO, 1992).

Dentro de este macrobloque MBNCB pueden separarse bloques con cierta independencia: Levingstone (BL), Moa-Nicaró-Sierra Cristal (BMNSC) y Yateras-Sabana La Mar (BYSLM), que coinciden con sus correspondientes anomalías isostáticas y gravimétricas homónimas. Según el modelo isostático que hemos asumido, estas anomalías indican la existencia de masas densas que están en defecto de compensación y a niveles superiores de la corteza; esta afirmación según nuestro modelo está en correspondencia con algunas interpretaciones que se han realizado de las causas de la existencia de la anomalía gravimétrica de Levingstone (RODRIGUEZ, 1983; CASTRO, 1987). La interpretación de la modelación gravimétrica realizada por CUEVAS (1994) coincide en señalar un levantamiento del límite corteza-manto en la zona de Levingstone, así como la masa de alta densidad, incluso hasta profundidades de dos kilómetros por lo que debe interpretarse como un efecto integrado de las dos causas para explicar esta anomalía, léase el acercamiento de Mohorovicic y la zona de alta densidad.

Las anomalías isostáticas tienen su causa fundamental en la descompensación isostática y en densas capas dentro de la corteza que pueden estar o no compensadas localmente (SIMPSON et al., 1986). En el caso de las anomalías isostáticas de Levingstone [1] (150 mGal, Fig. 1) las dos causas influyen en ella pero en mayor grado la zona de densidad anómala en los primeros kilómetros de la corteza, obsérvese la baja influencia en las CAA de 30-50 km. de las anomalías isostáticas, lo que no ocurre con el resto de las anomalías de esta zona oriental.

La interpretación realizada por CUEVAS (1994) dio que en la zona de la anomalía gravimétrica Moa-Nicaró existe una penetración de material profundo de la corteza hasta zonas poco profundas (>> 3km) y que se observa un mayor acercamiento de la Discontinuidad de Moho. Este diferente carácter del medio geológico es el que en opinión del autor hace que la anomalía isostática homónima alcance valores (230 mGal) mucho mayores que Levingstone [1] (150mGal). Aquí la profundidad de Moho debe estar más cerca a la superficie que en el caso de Levingstone.

En la CAA de 30 km. se determinan hasta valores de 6 mGal en Moa-Nicaró, no así en Levingstone (4 mGal). Esto hace pensar al autor de la presente investigación que hay una clara diferenciación en lo que hemos llamado BL y el BMNSC, nótese que en estos casos las anomalías isostáticas individuales (Fig.1/ Tabla 1), alcanzan valores mucho mayores (210-230 mGal), lo que de hecho habla de la menor profundidad a la que se encuentra Moho en todo este bloque (BMNSC), incluyendo al BYSLM, así como que el material profundo de la corteza se debe encontrar a poca profundidad, lo que también puede interpretarse de la influencia de estos bloques en la CAA 30 km. Por otra parte, estos dos últimos bloques se encuentran delimitados por valores del GHM de las anomalías isostáticas entre 5-7,5 mGal/km. en el BMNSC y de 5 mGal/km en el BYSLM donde precisamente se han producido algunos eventos sísmicos, estando estos bloques enmarcados en zonas de gradiente neotectónico fuerte (COTILLA et al., 1991), por lo que los mencionados bloques pudieran considerarse, como hipótesis preliminar, con movimientos isostáticos de reajustes.

Analizando las características del macro bloque isostático de la Sierra Maestra (MBSM) se puede decir que las dimensiones de la anomalía isostática Sierra Maestra [6] de hasta +200 mGal (Fig. 1) ocupan una menor área que en el MBNCB aquí se cumplen las mismas características sobre el defecto de compensación existente dadas las anomalías que se observan por lo que el límite corteza-manto debe de estar por encima del nivel isostático de compensación que en esta zona está entre los 32-34 km. según los cálculos que hemos efectuado y a los que nos referimos posteriormente. Esto indica que también esta evidencia puede interpretarse como que ocurren esfuerzos tectónicos de carácter vertical por el necesario ajuste isostático que debe de ocurrir. Es precisamente en esta zona límite de placa en donde se registra la mayor concentración de los epicentros de los terremotos ocurridos en la región oriental del país (75°9-77°2 Long. O), siendo también la de mayores valores del GHM isostático 15-20 mGal/km., por lo que según nuestra opinión deben existir eventos sísmicos causados por el reajuste isostático; esta misma zona de transición Fosa-Sierra Maestra coincide con un gradiente neotectónico muy fuerte a fuerte, lo que es sinónimo en ambos casos de

levantamientos hundimientos considerables en la etapa neotectónica del desarrollo geológico (COTILLA et al., 1991). Los resultados obtenidos en nuestra investigación también coinciden con un estudio de los mecanismos focales de los eventos sísmicos ocurridos en el arco del Caribe y en particular en la zona que nos ocupa realizado por ALVAREZ et al. (1985). Todos los casos, tanto de fallamiento normal como de la mezcla de fallamiento inverso con corrimiento por el rumbo, están indicando movimientos tectónicos verticales lo cual está en correspondencia con nuestro criterio de la existencia de tectónicos verticales también en este MBSM.

La zona central del país presenta un carácter distinto de las anomalías isostáticas (Fig. 1), son en general mucho menores que en la zona oriental, oscilando sus valores entre 30-80 mGal (Tabla 1), no comparables. Esto de hecho está indicando que el defecto de compensación en esta zona es mucho menor que en la zona oriental, de ahí que los bloques isostáticos de la zona central tienen un carácter menos significativo.

Un mayor detalle sobre el resto de los bloques isostáticos donde el del Escambray juega un papel preponderante puede verse en CUEVAS (1994).

Sobre el aspecto de la función de compensación isostática del límite corteza-manto y su influencia en algunos sectores de Cuba centro oriental se discutirá más adelante.

#### CARACTERIZACION ISOSTATICA DE LAS ZONAS SISMOGENERADORAS.

Se caracterizaron según el campo del gradiente isostático (CGI), las ZSG de la región bajo estudio (CHUY et al., 1992; GONZALEZ et al., 1994). En la región bajo estudio han sido delimitadas por investigaciones sismológicas 33 ZSG, las cuales fueron caracterizadas desde el punto de vista isostático, determinándose los valores del gradiente isostático, el cual fue utilizado como índice de la actividad sismogeneradora. Se determinó que los mayores gradientes isostáticos del país (15-20 mGal/km.) están dentro de las ZSG. Oriente 1, 2 y 3, precisamente las de mayor actividad sísmica y de mayor peligrosidad asociada,

lo que reafirma la mutua relación isostática-sismicidad; y otras como en la ZSG Sur Cubana, Norte Cubana 3 y Sabana se determinaron valores entre 5-7,5 mGal/km. considerados valores altos de este parámetro. En el resto de las ZSG se determinaron valores menores a 5 mGal/km. Este índice en cada ZSG permitió obtener estimaciones de la magnitud máxima de los terremotos ( $M_{max}$ ). Este parámetro fue utilizado para delinear algunas ZSG, así como la posible diferenciación dentro de una misma zona, de los valores del gradiente isostático. Este índice se utilizó para la delimitación de zonas potencialmente sísmicas ZPS en la región bajo estudio, lo cual se analizará más adelante.

En la Tabla 2 se han resumido los valores característicos del CGI para algunas de las ZSG de la región bajo estudio, así como sus valores máximos, calificando de manera cualitativa la posibilidad de delimitar algunas ZSG a través del CGI. Un mayor detalle sobre la caracterización cualitativa de las ZSG ha sido dado por CUEVAS (1994).

#### DETERMINACION DE LA MAGNITUD MAXIMA DE LOS TERREMOTOS A PARTIR DE LA INFORMACION GRAVITACIONAL.

Para llevar a cabo la determinación de las magnitudes máximas ( $M_{max}$ ) de los terremotos esperados en la región experimental a partir de la información gravitacional, se tomó en cuenta la distribución espacial del gradiente horizontal máximo de las anomalías isostáticas residuales, a una escala 1:1.000.000. La actividad sísmica de la misma región expresada en términos de su distribución espacio-energía liberada por cada terremoto se determinó teniendo en cuenta las mismas cuadrículas y seleccionando dentro de un área de 5 km. alrededor del centro de la cuadrícula  $M_{max}$  de los terremotos reportados en dicha área según el catálogo de datos macrosísmicos e instrumentales (1979-89). Se obtuvo una relación experimental cuyo coeficiente de correlación es  $r = 0,78$ . La expresión encontrada por el método del eje principal reducido -Reduced Mayor Axis RMA- es la siguiente:

$$M_{max}^{RMA} = 2,55 + 0,32 \text{grad}(\Delta g_{iso}) \quad (1)$$

Tabla 2. Valores máximos y característicos del gradiente máximo de las Anomalías Isostáticas Residuales para las zonas sismogeneradoras en la región de Cuba centro oriental.

Zona Sismogeneradora	Valores característicos (mGal/km)	Máximos valores (mGal/km)
1 Oriente 1 (norte) (BD CGI) (sur)	7,5 - 15,0 1,0 - 7,5	15 - 20
2 Oriente 2 (norte) (BD CGI) (sur)	7,5 - 15,0 2,0 - 7,5	
3 Oriente 3 (norte) (BD CGI) (sur)	7,5 - 10,0 1,0 - 7,5	10
4 Cauto Nipe (norte) (central) (sur)	3,0 - 5,0 1,0 - 3,0 3,0 - 5,0	6
6 Sabana 1 (MBD CGI)	5,0 - 7,5	
7 Sabana 2 (MBD CGI)	5,0 - 7,5	
17 Cubitas 2 (D CGI)	0 - 1,0	
18 Norte Cubana 3 (occ) (ó Sabana 3)(otal) (MBD CGI)	1,0 - 4,0 5,0 - 7,5	algo>7,5 (Otal)>10 (límite Sur) Algo>1 7,5
19 Norte Cubana 2 (D CGI)	1,0 - 3,0	3
20 Norte Cubana 1 (D CGI)	4,0 - 5,0	5
21 Sur Cubana (MBD CGI)	4,0 - 7,5	5 - 7,5
24 La Trocha (norte) (sur)(D CGI)	1,0 2,0 - 3,0	3
25 Sutura Central (D CGI otal)	1,0 - 3,0	4
30 Cochinos (norte)	2,0 - 4,0	5

LEYENDA:  
(MBD CGI) - Muy bien definida por el carácter del campo del gradiente isostático (CGI)  
(BD CGI) - Bien definida por el carácter del CGI  
(D CGI) - Delimitada por el carácter del CGI  
Los valores máximos reflejan el de toda la ZSG a no ser que se especifique

Esta relación la hemos considerado como la estimación de la magnitud del terremoto más probable, en un sentido no estrictamente asociado a un período de tiempo dado, como es conocido en peligrosidad sísmica e ingeniería sísmica, sino asociado a una simple regresión lineal. Ahora bien siguiendo la misma línea de razonamiento hemos utilizado como estimación límite superior (SUP), la región de confianza para la estimación de la variable independiente, cuya expresión puede aproximarse a:

$$M_{max}^{SUP} = 4,62 + 0,28 \text{grad}(\Delta g_{iso}) \quad (2)$$

Esta última relación límite la asumimos como la expresión que determina la magnitud del terremoto máximo posible.

Las referidas estimaciones muestran un comportamiento estable según las observaciones de las magnitudes de los epicentros determinados (CUEVAS, 1994).

Teniendo en cuenta estos resultados y partiendo de las relaciones antes estimadas y la distribución espacial del CGI se calcularon mapas (región centro oriental) para la magnitud del terremoto máximo posible  $M_{max}^{SUP}$  y para el terremoto más probable  $M_{max}^{RMA}$  también fue calculado un mapa de estimación de esta magnitud.

Estas determinaciones permiten, de hecho por primera vez en Cuba, poder utilizar la información gravitacional para estimar los valores de las magnitudes máximas de los terremotos, de forma tal de aportar un método más que complementa a los sismotectónicos, geológicos y sismológicos en las condiciones de Cuba, contribuyendo activamente a la solución del complejo problema de la determinación de las  $M_{max}$  de los terremotos en el país.

Las relaciones así obtenidas podrían mejorarse a medida que aumenten las observaciones de terremotos de  $M > 5$  que son los de menor frecuencia.

#### Gradiente isostático y actividad sísmica.

La actividad sísmica (A) de una región puede expresarse en términos de la frecuencia de ocurrencia de los terremotos en un período de tiempo determinado. Como puede apreciarse este es un parámetro que depende del tiempo, de ahí que para encontrar una correlación entre ésta y la información gravitacional, en este caso el gradiente isostático habría que estudiar un período de tiempo determinado para el cual dicho parámetro sea estable, o lo que es lo mismo, encontrar el período de tiempo mínimo de observación de la actividad sísmica, y este depende en primera instancia del régimen sísmico de la región estudiada (ARTEMJEV, 1980).

El análisis antes realizado nos indujo a pensar que de acuerdo a la información instrumental de las observaciones de terremotos catalogados para un período de 10 años, no sería suficiente para tener un parámetro estable, aunque este sólo podría determinarse realizando un estudio conjunto de la relación que buscamos con el análisis del régimen sísmico de la región oriental del país. No obstante se trabajó en la dirección de obtener una distribución espacial de la actividad sísmica ( $A_{Mo}=3$ ), este cálculo fue llevado a cabo para el período 1979-89 y un paso de muestreo de 10 km. Con esta información y la distribución del CGI, a la misma escala que la actividad sísmica ( $A_3$ ) se procedió al cálculo de la correlación entre ambos.

Este resultado negativo lo consideramos preliminar, dado que se hace necesario realizar otros

estudios para poder determinar en esta región cual es el período de tiempo necesario a tener en cuenta para considerar que el parámetro  $A_3$  es estable para poder establecer una relación con el CGI, de ahí que pensamos que este es un camino abierto pero no transitado totalmente.

#### ESQUEMA DE ZONACION DE LAS MAGNITUDES MAXIMAS, SEGUN LA INFORMACION ISOSTATICA: DELIMITACION DE ZONAS POTENCIALMENTE SISMICAS.

Anteriormente fue referida la no posibilidad de delimitar las zonas sismogeneratoras a partir de la correlación de la actividad sísmica, expresada en términos de la frecuencia relativa de la ocurrencia de terremotos y la información gravitacional.

Este problema motivó al autor de la presente investigación a establecer la posibilidad de utilización de la información gravitacional ya transformada en términos de la magnitud del terremoto máximo posible para realizar una zonación de las magnitudes máximas ( $M_{max}$ ), para lo cual se siguieron algunos principios (CUEVAS, 1994). Este razonamiento permitió establecer a partir de la información procesada, un esquema de zonación del parámetro estudiado ( $EZM_{max}$ ), que en algunos casos las zonas determinadas coinciden con las ZSG (CHUY et al., 1992; GONZALEZ et al., 1994) pudiéndose valorar una gradación en los valores de  $M_{max}$  estimados.

En la Fig. 2 se puede observar un mapa de esta zonación en la región de Cuba centro-oriental, donde se delimitan 17 zonas. En la región oriental un aspecto interesante a destacarlo es la diferente zonación con respecto a las ZSG Oriente 1, 2 y 3 lo que no se ha podido lograr con datos sísmológicos. Este esquema es de gran importancia pues se delimitan ZPS con sus valores característicos a partir de la información isostática.

#### ANALISIS COMPARATIVO DE LAS ESTIMACIONES DE $M_{max}$ PARA LAS ZSG, SEGUN INFORMACION ISOSTATICA Y SISMOLOGICA.

Los resultados hasta aquí mostrados, así como la determinación de las  $M_{max}$  a partir de la información gravitacional y la descripción característica

del CGI para cada ZSG de la región bajo estudio, se puede tener una idea cuantitativa de las magnitudes máximas posibles y más frecuentes a esperar en cada una de ellas utilizando las relaciones (1) y (2).

Esto nos permitió realizar una comparación de estas estimaciones y las obtenidas por otros métodos de estimación de este mismo parámetro, como lo son a partir del gradiente de velocidad de los movimientos recientes verticales (grad v) y del que considera las dimensiones y profundidades (DP) de las estructuras tectónicas. Esta comparación realizada con los trabajos de GONZALEZ et al. (1994) arrojó que para el método del grad v la coincidencia con nuestra estimación estaba en un 67% y con respecto a la DP la coincidencia fue mayor, de un 93%.

Otro aspecto quizás más interesante resultó la comparación realizada con las estimaciones realizadas por algunos de los diferentes autores que han dado estimaciones de las ZSG en la región centro oriental del país, teniendo en cuenta además de los métodos del grad v y DP, valoraciones de tipo sísmológico y sismotectónico. Esta comparación se ilustra en la Tabla 3, donde la estimación determinada en la investigación se da en un rango determinado por el carácter del CGI (ver Tabla 2), dándose un estimado único teniendo en cuenta el  $EZM_{max}$  realizado en el epígrafe anterior. En la Tabla 3 se puede observar que las determinaciones realizadas por BELOUSOV et al. (1983) coinciden en un 33% (zona central) y el 67% es sobrestimada con respecto a las realizadas en la presente investigación, en esta misma zona GONZALEZ et al. (1994) realizó un trabajo de reevaluación de las potencialidades de la ZSG, a la luz de nuevos datos geólogo-geofísicos, incluyendo las determinaciones de profundidad y extensión de las fallas asociadas a las ZSG (CUEVAS et al., 1992), la coincidencia fue mayor (63%). En una etapa posterior en el mismo trabajo se tomaron en cuenta los resultados aquí obtenidos aumentando la coincidencia a un 92% con una sobrestimación de sólo el 8%. En la zona oriental la comparación se realizó en primer lugar con los trabajos realizados por CHUY et al. (1992) existiendo una coincidencia en las estimaciones de un 72% y una sobrestimación del 22% con un 6% de infraestimación. Considerando el trabajo realizado por COTILLA (1993) que considera en

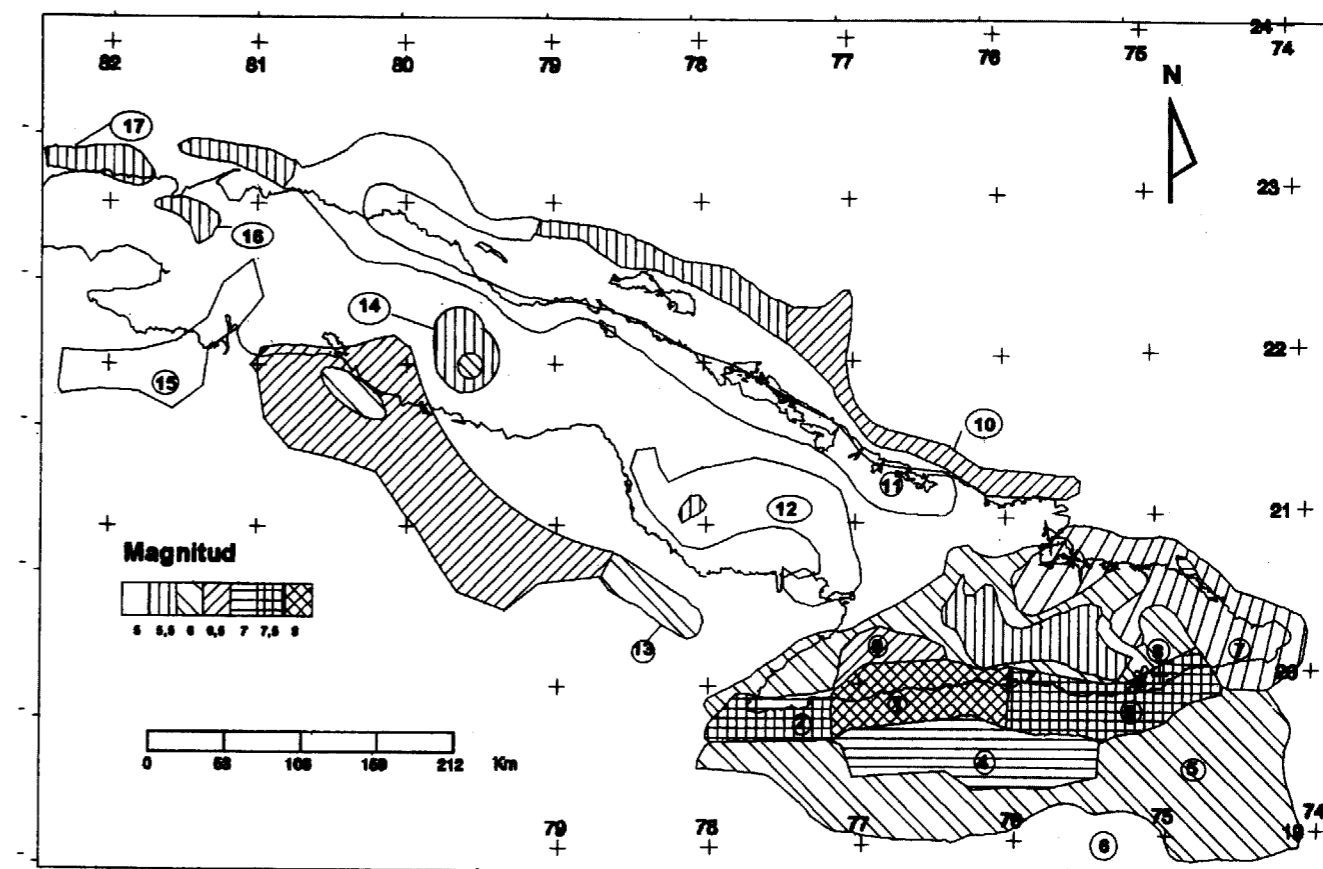


Fig. 2. Esquema de Zonación de Magnitudes Máximas ( $M_{max}$ ), según la información isostática de Cuba centro oriental.

general toda la región bajo estudio se determinó una coincidencia del 37% y un 63% de sobrestimación. Como puede verificarse del análisis aquí realizado, existe en general una buena coincidencia aunque en los casos que este nuevo parámetro no pudo ser tomado en cuenta la coincidencia en estimaciones es más baja con una tendencia alta en la sobrestimación. Esto nos induce a pensar que se hace imprescindible la realización de un trabajo de generalización que incluya esta novedosa información que puede servir de catalizador y de ayuda en la discriminación de ZSG ya que por el CGI es posible delinear la existencia de alguna de ellas.

#### ESPESOR DE LA CORTEZA TERRESTRE Y SU FUNCION DE COMPENSACION ISOSTATICA EN LA REGION DE CUBA CENTRO ORIENTAL

De acuerdo a la teoría de Isostasia de Airy-

Heiskanen (HEISKANEN y MORITZ, 1967), si bien el nivel de compensación está situado a una profundidad constante alrededor de la Tierra, el material que está por encima forma una corteza de baja densidad que yace sobre un substrato (manto) de alta densidad. La corteza y el manto tienen densidades uniformes (aunque diferentes), y el límite entre ellos refleja la topografía de la superficie. En otras palabras, el equilibrio isostático se consigue mediante variaciones en la profundidad del límite corteza-manto. A esta profundidad suele llamarse de compensación y define el espesor isostático de la corteza.

**Método de predicción de fronteras geológicas cuasiarmónicas.** Se basa en la relación existente entre las variaciones del relieve de una frontera geológica armónica y el campo gravitacional provocado por la misma, en un nivel plano superior y horizontal a partir del análisis espectral

Tabla 3. Estimaciones de la  $M_{max}$  para cada zona sismogeneradora en la región de Cuba centro oriental, según información isostática. Comparación con estimaciones sismológicas (según BELOUSOV et al., 1983; 1983 CHUY et al., 1992; COTILLA, 1993; GONZALEZ et al., 1994).

No	Zona Sismogeneradora	$M_{max}(1)$	$M_{max}(2)$	$M_{max}(3)$	$M_{max}(4)$	$M_{max}(5)$
1	Oriente 1	8,7-8,8 8,8	8,0	8,0	8,0	-
2	Oriente 2	8,7-8,8 7,5	8,0	7,6	<8,0	-
3	Oriente 3	8,7-7,5 7,5	8,0	7,6	<8,0	-
4	Cauto - Ni- pe(norte) (central)	5,5-6,6 6,5	-	7,0	7,0	-
	(sur)	5,5-6,3 6,5	-	7,0	7,0	-
6	Sabana 1	6,0-7,4 7,0	-	7,0	7,0	-
7	Sabana 2	6,0-6,7 6,5	-	6,5	6,5	-
17	Cubitas 2	4,6-5,0 5,0	-	5,5	6,5	-
18	Norte Cubana (ó Sabana 3) (occ) (total)	4,8-6,0 5,5	-	6,0	7,0	6,5
19	Norte Cubana 2	4,8-5,5 5,5	-	-	7,0	5,6
20	Norte Cubana 1 (occ)	5,5-6,0 5,5	-	-	7,0	-
21	Sur Cubana	6,0-6,7 6,5	6,5	-	6,5-7,0	6,0
24	La Trocha	5,2-5,5 5,5	-	-	6,5	6,0
25	Sutura Central	4,8-5,7 5,5	7,0	-	6,5	5,8
30	Cochinos	4,8-5,5 5,5	-	-	6,5	5,3

LEYENDA:  
 $M_{max}(1)$  - Estimación según el autor del presente trabajo  
 $M_{max}(2)$  - Estimación según Belousov et al., (1993)  
 $M_{max}(3)$  - Estimación según Chuy et al., (1992)  
 $M_{max}(4)$  - Estimación según Cotilla (1993)  
 $M_{max}(5)$  - Estimación según González et al., (1994)

(ALFONSO y CASTRO, 1978). En lo adelante nos referimos a este método como de máxima entropía (ME).

**Materiales sísmicos y perfiles regionales.** Estos fueron seleccionados a partir de la interpretación hecha por SHERVAKOVA et al. (1977) en algunos perfiles del método de las ondas de cambio de los terremotos (MOCT) utilizándose 5 perfiles (III, IV, V, VII y XI), estos son los que brindan mayor información de la región de estudio.

Estos perfiles fueron prolongados hasta donde existía información gravimétrica (incluso en zonas marinas) y de esta forma se confeccionaron los perfiles regionales incluyendo dos (I y II) interpretados por CUEVAS (1994).

#### Espesor de la corteza terrestre, espesor isostático y función de compensación isostática.

En la presente investigación se ha utilizado la información del MOCT y la técnica también espectral ME, con el objetivo de utilizar la infor-

mación gravimétrica (anomalías de Bouguer total, CUEVAS, 1994) en algunos perfiles del MOCT y analizar sobre la base de los datos así obtenidos del espesor de la corteza terrestre ( $H_M$ ) y por otro lado el espesor isostático de la corteza terrestre ( $H_{iso}$ ), la función isostática de la misma.

Al aspecto del espesor isostático de la corteza, ( $H_{iso}$ ) dedicaremos nuestra atención primeramente. En  $H_{iso}$  es equivalente al espesor necesario para que ocurra el equilibrio isostático de acuerdo a la teoría de la Isostasia de Airy-Keiskanen. Este espesor fue calculado para la región de Cuba centro oriental en el marco de la presente investigación a una escala 1:1.000.000. En este mapa se determinan claramente dos zonas dentro del territorio de Cuba donde los espesores isostáticos alcanzan más de 31 kilómetros: una la zona correspondiente a la SM, Sierra de Nipe Cristal (SNC) y Sierra de Purial (SP), en la parte oriental y otra en la parte central representada por el macizo del Escambray. La zona más occidental de nuestra región de estudio sólo sobrepasa los 30,5 kilómetros en la zona correspondiente a las Alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo y de La Habana-Matanzas. Estos mismos espesores se encuentran en la zona central de Camagüey al NE en la Sierra de Cubitas; también en la zona de Puerto Padre-Holguín (Alturas de Maniabón).

Dadas las características del  $H_{iso}$  en Cuba centro oriental, así como del límite corteza-manto según el MOCT y el método ME, se ha realizado un análisis en algunos perfiles regionales de la función isostática de la corteza terrestre. Aquí se exponen tres, uno en la región más oriental (Perfil I), un segundo en la parte central (Perfil IV) y otro en la zona más occidental del territorio bajo estudio (Perfil III).

**Perfil I.** En la Fig. 3 se muestra una composición de varias informaciones. En este perfil de acuerdo a los datos del MOCT en todo el tramo entre 105-250 km. se observa un desnivel entre  $H_{iso}$  y  $H_M$ , ocurriendo que  $H_{iso} > H_M$ , lo que en términos de la Teoría de la Isostasia se denomina defecto de compensación.

Nótese la correspondencia de esta información en profundidad con los valores positivos de las

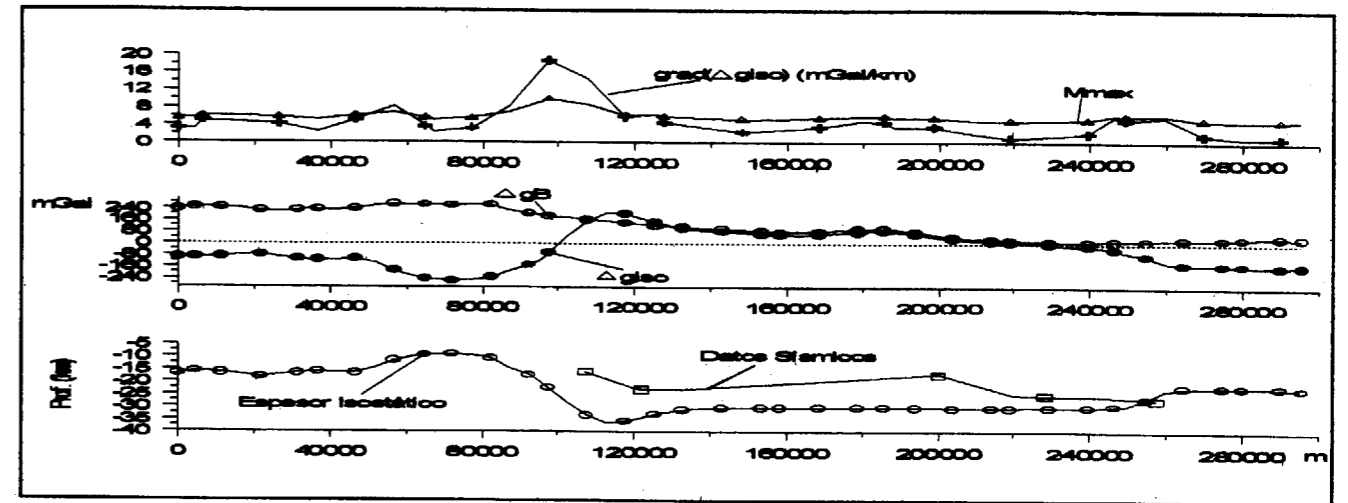


Fig. 3. Representación del Perfil I. En la parte inferior: espesor isostático, límite corteza-manto por datos de MOCT; parte central: anomalías de Bouguer total e isostática; parte superior: anomalías del gradiente isostático y de  $M_{max}$ . Coordenadas: Punto inicial (19,03°N-76,83°O), Punto Final (21,65°N-76,28°O). Zona: Provincias orientales.

AIR, alcanzando su mayor valor (190 mGal) en la parte de la SM donde precisamente el desnivel  $H_{iso}-H_M$  tiene su mayor valor (15 km.). Los valores de las anomalías de Bouguer total (ABT) en esta zona son positivos y de un carácter creciente lo que indica también el desequilibrio isostático existente en la zona. Analizando la tendencia de la curva de las AIR donde se determinan valores mínimos negativos correspondientes a la anomalía isostática Fosa Oriente, puede concluirse que la Discontinuidad de Moho en esta zona debe tomar valores por debajo de los 10 km. (Tramo 50-90 km.), pudiendo llegar a los 20 km. mucho más al sur (tramo 0-50 km.), esta inferencia isostática reafirma lo obtenido en el moldeaje gravimétrico de este perfil (CUEVAS 1994).

En la zona norte del perfil un similar análisis del  $H_M$  puede realizarse debiendo estar por debajo del  $H_{iso}$  a unos 25 km. de lo que también corresponde con el modelaje gravimétrico. En esta estructura de  $H_M$  por encima de  $H_{iso}$  según el esquema de Airy-Heiskanen deben de ocurrir esfuerzos tectónicos verticales, para alcanzar el equilibrio isostático, se observa en la parte superior de la Fig. 3 en la zona entre la Fosa y la SM se determinan los mayores valores del gradiente isostático (incluso hasta 18 mGal/km.) los que están relacionados con valores esperados de terremotos con  $M_{max}^{sup}=8$  (según los datos isostáticos). Este análisis reafirma nuestra opinión de la

posibilidad de que ocurran movimientos tectónicos verticales y a los que nos referimos cuando analizamos la naturaleza de las principales anomalías isostáticas al encontrar movimientos sísmicos en esta zona con mecanismo focales que indican este tipo de movimiento (ALVAREZ et al., 1985).

**Perfil II-II'.** Este perfil cruza el Macizo Escambray de forma casi perpendicular a la estructura. Puede notarse que a partir de los 150 km. (hacia el norte) el  $H_{iso} \approx H_M$  lo que también se interpreta del análisis de las AIR que se acercan al valor 0 (Fig. 1). En la parte sur se observa de acuerdo a las AIR que  $H_M$  debe ser mayor que  $H_{iso}$ . En la Fig. 4 se muestran las estimaciones realizadas con el método ME, efectivamente expresan la inferencia isostática realizada, en este caso las estimaciones dan entre 27-32 km. del límite corteza-manto, dando desniveles de 2-14 km. hacia el sur, aunque esto no parece muy consistente dado que las AIR no sobrepasan los -100 mGal, lo que hace pensar al autor que en esta zona el límite corteza-manto podría estar entre 27-22 km. hacia el sur. Esta última interpretación isostática tiene consistencia con una generalización para el Caribe realizada por CASE et al. (1990), con respecto a la interfase de Moho. En la zona de Escambray (tramo 92-145 km.) se determinan con más claridad un mínimo gravimétrico contrapuesto a un máximo de las AIR de algo más de 80 mGal, que

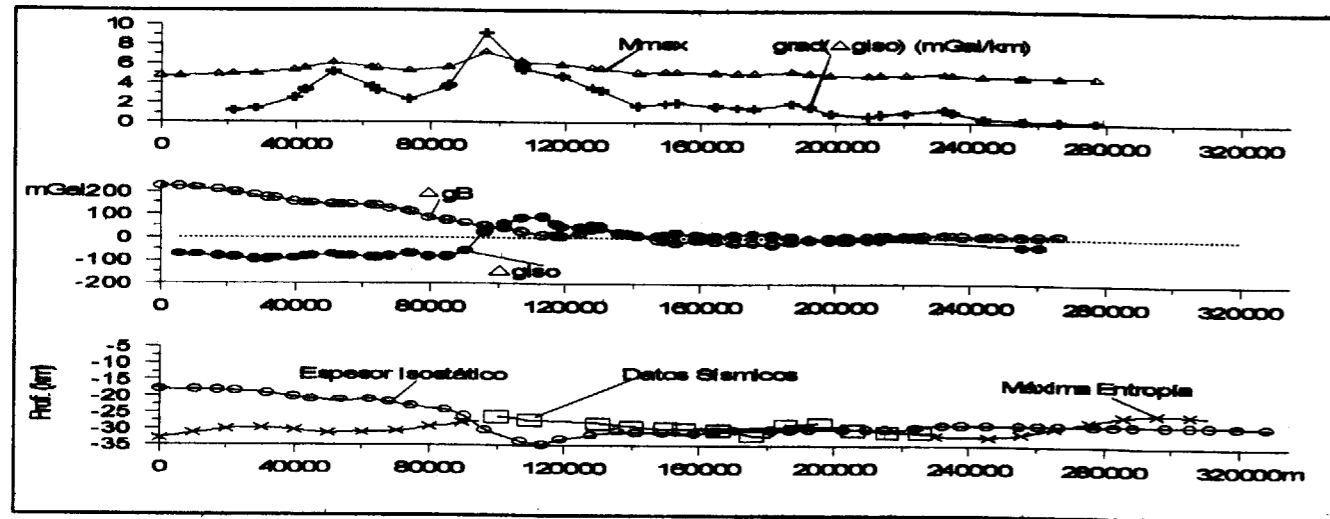


Fig. 4. Representación del Perfil II-II'. En la parte inferior: espesor isostático, límite corteza-manto por datos de MOCT; parte central: anomalías de Bouguer total e isostática; parte superior: anomalías del gradiente isostático y de  $M_{max}$ . Coordenadas: Punto inicial (21,08°N-80,62°O), Punto Final (23,71°N-79,09°O). Zona: Escambray.

indica diferencias entre el  $H_{iso}$  y  $H_M$  que en este caso alcanza los 7 km. Si bien este macizo está cerca del equilibrio isostático, no dejan de haber fuentes para los movimientos tectónicos verticales asociados al ajuste isostático, como potencialidad para la ocurrencia de eventos sísmicos, cuestión esta que dado el gradiente isostático máximo que se determinó a los 95 km. del

comienzo del perfil (9 mGal/km.) se puede estimar puntualmente una  $M_{max}^{sup} \leq 7$  para el terremoto máximo posible, coincidente con la ZSG Sur Cubana (ZPS 13, Fig.2).

**Perfil III.** Este perfil situado en lo más occidental de nuestra área de estudio presenta una correspondencia normal entre los espesores isostáticos

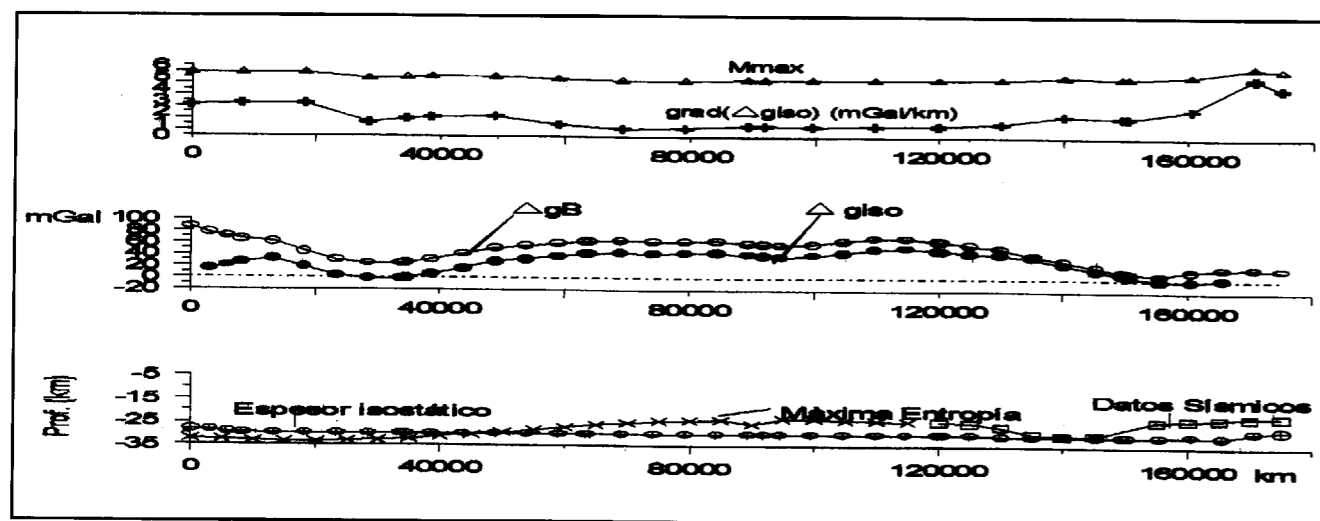


Fig. 5. Representación del Perfil III. En la parte inferior: espesor isostático, límite corteza-manto por datos de MOCT; parte central: anomalías de Bouguer total e isostática; parte superior: anomalías del gradiente isostático y de  $M_{max}$ . Coordenadas: Punto inicial (21,69°N-81,72°O), Punto Final (23,32°N-82,04°O). Zona: Habana-Matanzas.

que oscilan alrededor de los 30 km. y el  $H_M$ . En la parte norte del perfil (120-175 km.), donde único se cuenta con datos de MOCT (Fig. 5), sólo puede inferirse que las AIR tienden a aumentar el nivel, lo que puede corresponder con el levantamiento de Moho de esta zona (160-170 km.), aunque no está del todo claro dado que no existen datos isostáticos. En la zona entre los 45-115 km. donde se estimó Moho según ME se observa un suave levantamiento de  $H_M$ . Con respecto a  $H_{iso}$  que alcanza como valor máximo 7 km., este levantamiento coincide en gran medida con el máximo isostático sostenido que se observa en este perfil ( $> 50$  mGal). Al sur no se observa buena correspondencia.

## CONCLUSIONES

Por primera vez en Cuba se cuenta con un mapa gravimétrico sobre la base de la concepción de las hipótesis isostáticas, así como una interpretación, constituyendo ambos aportes al conocimiento sobre la geofísica regional del territorio cubano.

Desde el punto de vista sismológico, aquí la geofísica abordó un aspecto escabroso de la peligrosidad sísmica, la estimación de las  $M_{max}$  de una región, desde un ángulo nuevo, incrementando el nivel de conocimiento de este parámetro, y con mayor relevancia, permite que con escasa información sismológica histórica e instrumental acceder por una vía alternativa, a la estimación de las  $M_{max}$  y a la determinación de zonas potencialmente sísmicas, donde suelen proyectarse y construirse grandes obras económico-sociales.

Quedó establecida por primera vez en Cuba una relación paramétrica entre la información gravitacional en reducción isostática con la sismicidad de la región de Cuba centro oriental, expresada en términos de su distribución espacio-energía liberada por cada terremoto, contribuyendo activamente a la solución del complejo problema de la determinación de las  $M_{max}$  a esperar para cada ZSG, según esta nueva información, pudiéndose establecer una gradación de la estimación para una misma ZSG, lo que no puede obtenerse con datos sismológicos.

Se estableció por primera vez en Cuba una zona-

ción de las  $M_{max}$  de los terremotos a esperar en Cuba centro oriental, a partir de la información isostática lo que permitió por otra parte delinear algunas ZSG.

Se establecieron dos macrobloques isostáticos ubicados en la región oriental de Cuba: Sierra Maestra y Nicaro-Cristal-Baracoa. Dentro de los cuales pueden definirse algunos bloques. Estos macrobloques caracterizados por los altos valores de las anomalías isostáticas pueden ser considerados como fuentes potenciales de esfuerzos tectónicos verticales causados por la necesidad del ajuste isostático. Otros bloques isostáticos fueron definidos en la región central del país pero de menores potencialidades que los de la región oriental.

El análisis de la función isostática de la corteza terrestre en los diferentes sectores de Cuba centro oriental ha permitido conocer sobre las potencialidades de los movimientos tectónicos verticales de ajustes isostáticos, pudiéndose establecer el diferente carácter de los esfuerzos tectónicos en la región oriental y en la central.

Existe una buena correspondencia de la información sobre el límite corteza-manto con los valores de las anomalías isostáticas residuales (AIR), que donde alcanzan sus mayores magnitudes está indicando un defecto de compensación que está en correspondencia con los mayores valores del gradiente horizontal máximo (GHM) de las AIR, donde se determinan también altos valores de las  $M_{max}$  de los terremotos (según datos isostáticos). Estas regiones coinciden con zonas sismo-generadoras de terremotos.

Quedó establecida la posibilidad de calcular el límite corteza-manto a partir de las AIR y el espesor isostático calculado para toda la región.

En la zona sur de los Perfiles I, coincidente con el límite norte de la Placa Caribe se determinaron los mayores valores del GHM de las AIR, así como los altos valores de las AIR y positivos también de las Anomalías de Bouguer Total indican sobre el defecto de compensación, por lo que deben producirse movimientos tectónicos verticales debidos a ajustes isostáticos. Esta inferencia de carácter isostático se ve confirmada por estudios anteriores sobre mecanismos focales de



terremotos que indican este tipo de movimientos.

Puede concluirse que en la zona del Macizo Escambray existe aún un cierto defecto de compensación, que puede provocar movimientos tectónicos verticales de ajustes isostáticos.

El establecimiento por primera vez en Cuba de las relaciones isostasia-sismicidad permiten afirmar que los estudios de sismicidad en nuestro país deben considerar el campo de las anomalías isostáticas.

#### REFERENCIAS

ALFONSO, J. R. y CASTRO, J. (1978): Una metodología para el estudio de fronteras geológicas cuasiarmónicas. *Rev. Cien. Téc. Geod y Geof.*, No 2, pp. 25-58

ALVAREZ, L., RUBIO, M., CHUY, T y COTILLA, M. O. (1985): Mecanismos focales en el arco del Caribe. En Estudio de la sismicidad de la región del Caribe y estimación preliminar de la peligrosidad sísmica en Cuba [inédito]. Reporte, Inst. Geof. y Astron., La Habana, pp. 29-72 [en ruso]. De. Nauka, Moscú, 216 pp.

ARTEMJEV, M. E. (1975): Isostasia del territorio de la URSS [en ruso]. Ed. Nauka, Moscú, 216 pp.

ARTEMJEV, M. E. (1980): Anomalías del campo gravitacional y la sismicidad [en ruso]. En Regionalización sísmica del territorio de la URSS (V.I. Buné y G.P. Gorchkov, eds.), Ed. Nauka, Moscú, pp. 37-41.

BELOSOV, T. P., KRESNIKOV, V. N. y SHEBALIN, N. V. (1983): Delimitación de zonas sismogeneradoras en Cuba central y estimación de su magnitud máxima. Investigaciones de la sismicidad de las zonas de baja actividad sísmica (Cuba central) [en ruso]. Ed. Nauka, Moscú, pp. 81-85.

CASTRO, J. J. (1987): "Sistema automatizado para el procesamiento e interpretación bidimensional de campos potenciales" [inédito]. Tesis de Doctorado ISPJAE, La Habana, 113 pp.

CHUY, T. et al. (1992) "Esquema de zonas sismogeneradoras de Cuba oriental" [inédito]. Academia de Ciencias de Cuba.

COBIELLA, J. (1983): Algunas consideraciones sobre el origen de la Fosa de Bartlett. *Rev. Minería y Geología*, No. 1, pp. 29-56.

COTILLA, M. O. (1993): "Una caracterización sismotectónica de Cuba" [inédito]. Tesis de Doctorado, Inst. Geof. y Astron., La Habana, 105 pp.

COTILLA, M. O., BANKWOTZ, P., FRANZKE, H. J., ALVAREZ, L.

y GONZALEZ, E. et al. (1991): Mapa sismotectónico de Cuba, escala 1:1.000.000. *Comun. Cient. sobre Geof. y Astron.*, No. 23, 37 pp.

COTILLA, M. O., BANKWOTZ, P., DIAZ, J. L. y CAÑETE, C. C. (1990): "Mapa neotectónico complejo del extremo oriental de Cuba y la parte meridional" [inédito]. Reporte, Inst. Geof. y Astron., La Habana, 12 pp.

CUEVAS, J. L. (1994): "Caracterización de Anomalías de la Gravedad en Cuba centro oriental y su utilización en Tectónica y Sismicidad" [inédito]. Tesis de Doctorado, Inst. Geof. y Astron., La Habana, 146 pp.

CUEVAS, J. L., FUNDORA, M., PACHECO, M. y POLO, B. (1989): Nuevo Mapa de Anomalías Gravimétricas de Bouguer para la República de Cuba a escala 1/500.000. En 1er. Congreso Cubano de Geología, La Habana, marzo, Resúmenes, p. 114

GONZALEZ, B. E., CHUY, T., ALVAREZ, L., ORBERA, L., RUBIO, M., CUEVAS, J. L. y ARANGO, E. et al. (1994): "Estudios Sismológicos Regionales Complejos de Cuba centro oriental para el emplazamiento de objetivos nucleares" [inédito]. Reporte., CENAI, La Habana y en III Encuentro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, 10-11 Febrero, CENAI, Resúmenes.

HEISKANEN, W. A. y MORITZ, H. (1967): *Physical Geodesy*. De. W. H. Freeman., New York, 364 pp.

KARKI, P., KIVIOJA y HEISKANEN, W. A. (1961): Topographic-isostatic reduction maps for the world for the Hayford zones 18-1, Airy-Heiskanen system, T=30 km. *Publ. 35, Isostatic Inst. of the Int. Assoc. of Geod.*, Helsinki, 23 pp.

MARQUEZ, M. y CALVO, J. C. (1992): "Características de la geodinámica reciente del entorno geográfico del Complejo Hidroenergético Toa-Duaba" [inédito]. Reporte., Cen. Inv. Geod. y Teled., La Habana, 10 pp.

McCOLLUM, E. V. (1940): "Gravity-meter survey in El Santo area Santa Clara Province, Cuba" [inédito]. *Atlantic Geological Report No. 140*, Houston, Texas, Mott Smith Corporation., p.4.

RODRIGUEZ, J. (1983): Modelo gravitacional de la corteza terrestre de Cuba oriental. *Rev. Minería y Geología*, No. 3, pp.7-18.

SHERBAKOVA, B., BOBENKO, V. y HERNANDEZ, G. (1977): Utilización del método de las ondas de cambio de los terremotos para el estudio de la estructura profunda de la Isla de Cuba [en ruso]. *Prikladnaya Geofizika*, No. 87, Moscú, pp. 60-71.

SIMPSON, R. W. y JACHENS, R. C. (1986): A new Isostatic Residual Gravity Map of the conterminous United States with a discussion on the significance of isostatic residual anomalies. *J. Geophy. R.*, V. 91, No. B8., pp. 8348-8372.

VALEK, R. (1972): Vypocet gradientu anomálního pole v geofyzice. *Geologicky Průzkum*, No. 4, pp. 116-117.

Original recibido: Diciembre 1997.

Original aceptado: Marzo 1998.

## EVALUACION INFORMATICA CUANTITATIVA DE LA ALTERACION EN EL COLOR DE UN PAISAJE. APLICACION AL CASO DE UNA LABOR MINERA DE SUPERFICIE.

Por L. J. FERNANDEZ GUTIERREZ DEL ALAMO (\*) y J. I. DIAZ DE VILLAFRANCA GARCIA (\*\*)

#### R E S U M E N

Entre los impactos medioambientales más importantes que produce la minería de superficie está la alteración del paisaje. El método desarrollado se basa en el análisis del paisaje divisado desde la posición del observador. Estudiando por separado el grado de alteración que sufren los tres parámetros principales que caracterizan un paisaje (topografía, color y textura) se logra una mayor sensibilidad del método de valoración. El evaluador podrá determinar en cada caso concreto que características del diseño de la explotación producen un mayor impacto en el observador.

*Palabras clave:* Impacto visual, Color, Mina, Paisaje.

#### A B S T R A C T

One of the most important environmental impacts produced by surface mining is landscape alteration. The developed method is based on the landscape's analysis from the observer's position. Analyzing in separated ways the variations in the principal characteristics of the landscape (topography, color and texture) the evaluation method gets more sensibility. The evaluator will determine, in each situation, which characteristics of the design produce bigger impact in the observers.

*Key words:* Visual impact, Color, Mine, Landscape.

#### INTRODUCCION

Uno de los mayores condicionantes que sufre la minería de superficie es la limitación de actuación debido al impacto visual que conlleva. El movimiento de tierras, la eliminación aunque sea temporal de la cobertera, y a fin de cuentas la alteración inevitable del paisaje, repercute en el montante del proyecto en forma tal que puede llegar a hacerlo inviable. En todo proyecto minero se deben estudiar las alternativas, técnicamente posibles, que minoren el impacto producido.

(\*) Dr. Ingeniero de Minas. Dpto. de Explotación de Minas. ETSI Minas. UPM

(\*\*) Dr. Ingeniero de Minas. Dpto. de Física Aplicada a los Recursos Naturales. ETSI Minas. UPM.

las diferentes alternativas. En este artículo se trata del parámetro medidor de la alteración en el conjunto de colores de un paisaje.

El cambio del paisaje tras la realización de una explotación minera en superficie, viene en gran parte producido por la aparición de nuevos contrastes entre los distintos materiales, e incluso la aparición de algún color que no existía antes. La supresión de la cobertura vegetal implica cambios drásticos en la apreciación del conjunto de colores existentes, determinando el impacto visual que se produce en el observador. Es por ello que el color, como caracterizador del paisaje, debe analizarse en profundidad, evaluando tanto la croma y la luminosidad, como los contrastes o diferencias de color.

El análisis del cambio sufrido por el conjunto de los colores permitirá evaluar la distinta capacidad de integración de una labor minera en un paraje (función de la capacidad de absorción visual), así como las posiciones de observación desde las cuales se aprecia menos la alteración.

Para poder analizar la alteración visual desde el punto de vista del espectador, debe estudiarse el paisaje tal y como lo divisa el observador; es por ello que el enfoque general del método consiste en referenciar el paisaje a las distintas posiciones de observación de la zona alterada. El primer paso es asociar al terreno una malla regular (MDT), cuyos vértices vienen determinados por la altitud, por el color y por la textura de su celda o área de influencia. El siguiente paso es, utilizando coordenadas esféricas (fig. 1) obtener una representación, lo más real posible, del paisaje observado desde cada posición.

Partiendo del modelo digital del terreno se localiza la zona a alterar, calculando las cuencas visuales anterior y posterior a la modificación, entendiendo como cuenca visual el área que es visible desde ese punto (AGUILO, 1993). El proceso se basa en analizar los campos visuales de los observadores que aprecian alguna variación, tanto los que veían el terreno original, como los que divisan posteriormente la labor minera. El análisis se realiza sobre una proyección cónica que representa bastante fielmente lo visto por el observador y sobre la que se estudian los colores de los vértices que componen el paisaje. Esta

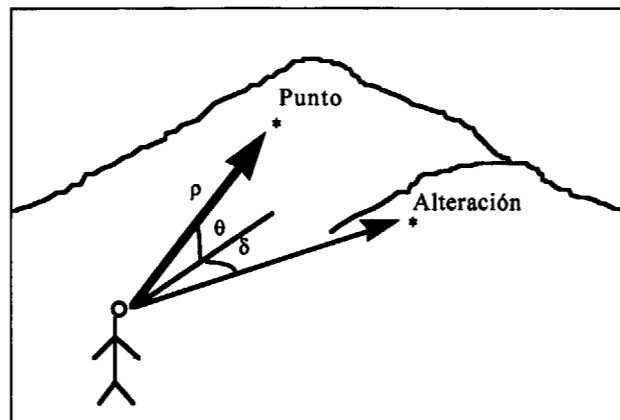


Figura 1. Sistema de coordenadas

idea ya fue utilizada para poder evaluar la importancia de un objeto dentro del campo visual (IVERSON, 1975).

Es sobre estas proyecciones sobre las que se procederá, con posterioridad, a analizar la variación introducida por la alteración. Para cada vértice, se calcula su polígono de Thiessen, entendiéndolo como el conjunto de puntos del plano más cercanos a este vértice que a ningún otro. Dos vértices, producirán contraste, si tienen un lado común en sus polígonos asociados.

#### CARACTERIZACION DEL COLOR

Estudiar los colores de un paisaje plantea diversos problemas. El primero y principal es su caracterización. Si se asocia un color a un punto, dicho color debe quedar determinado para cualquier experto que realice el estudio. Al mismo tiempo debe tenerse en cuenta su luminosidad, lo que determinará la apreciación de la alteración en función de los colores que implique.

En vista a las cuestiones presentadas, se decidió estudiar el color desde el punto de vista del observador, como diferencia de los distintos estímulos que recibe. Asociar a un elemento del paisaje un color, es tanto más difícil cuanto mayor precisión se exija. La influencia que tiene el iluminante (el Sol), sobre el color de un objeto, impide concretar mucho en su determinación (LOZANO, 1978). No tiene sentido solicitar una

precisión extrema, si luego, cuando sea observado bajo la luz natural, va a depender de la hora y las condiciones atmosféricas. Tampoco se pueden agrupar varios colores similares bajo la misma denominación ya que, si bien el ojo humano es capaz de discriminar 300 colores mediante su observación aislada (uno a uno) es capaz de diferenciar casi cinco millones por comparación entre muestras.

La solución de compromiso que se adopta es buscar un sistema de coordenadas que permita determinar el color y que a su vez valore la diferencia que aprecia el ojo humano entre colores.

#### SISTEMA DE COORDENADAS CIELab\*

La visión humana es siempre la referencia para efectuar una medida física del color; el color es un concepto íntimamente ligado a los fotopigmentos de la retina y a la interpretación que posteriormente efectúa el cerebro. Por ello cuando se utiliza un instrumento físico para la medida del color, éste lo que ha de hacer es imitar el funcionamiento del ojo humano, sustituyendo los detectores fisiológicos (conos y bastones) por detectores electrónicos, y la evaluación del cerebro por cálculos matemáticos. Esto proporciona a la medida del color su carácter psicofísico que implica una dependencia del observador.

La sensación que del color tiene el ser humano se puede descomponer en tres parámetros, ejes de un sistema de coordenadas, que permite caracterizar un color dado. Estos tres ejes del color son la claridad o luminosidad, el tono o matiz y la cromaticidad o tinte.

Se encuentran normalizadas por el C.I.E (Commission Internationale de L'Eclairage) las tres curvas o funciones de ponderación, que permiten pasar de un espectro radiante de frecuencias a tres números o valores correspondientes al estímulo. Estas curvas deben estar relacionadas con el comportamiento del ojo humano, de tal manera que a igualdad de estos tres números corresponda la igualdad de la sensación de color. Estas curvas son denominadas como curvas de mezclas del color y fueron definidas por el C.I.E.

en 1931 para el Observador Patrón (observador humano medio).

De esta forma cualquier color puede descomponerse en los tres colores primarios del C.I.E. para el observador medio en proporciones adecuadas. Las cantidades de los colores primarios rojo, verde y azul se designan como X, Y, Z. El verde primario Y se ha elegido de manera que aporta toda la luminosidad. Los valores X, Y, Z, son denominados valores triestímulos y se verifica que si dos materiales pueden ser representados por idénticos valores triestímulos, éstos tienen igual color bajo idénticas condiciones de iluminación.

La transformación de los valores triestímulos X, Y, Z en coordenadas cromáticas proporciona un espacio de color que si bien es útil en cuanto a especificación del mismo, no lo es para comparar muestras. Esto se debe a la no uniformidad del espacio cromático, teniendo una diferente sensibilidad para la diferencia de color según en que zona del mismo nos encontremos. Para evitar las irregularidades del espacio cromático XYZ el propio C.I.E. ha desarrollado espacios más uniformes, como el CIELab\*, que se obtiene a partir del anterior mediante:

$$L^* = 116 \times \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - 16$$

$$a^* = 500 \times \left( \sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} \right)$$

$$b^* = 200 \times \left( \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}} \right)$$

En este espacio, la variable L representa la luminosidad de la muestra, al igual que Y lo hace en el sistema triestímulo XYZ (puede observarse que en su ecuación de cálculo tan sólo interviene como variable la luminosidad Y). El eje L representa la variación en la escala de grises siendo L = 0 para el negro ideal, y L = 100 en el blanco perfecto.

Los ejes a y b forman un plano cromático en el cual en el extremo positivo del eje a se halla el

rojo y en el negativo el verde. El extremo positivo del eje **b** corresponde al amarillo y el negativo al azul. Este espacio se ha representado en la figura 2.

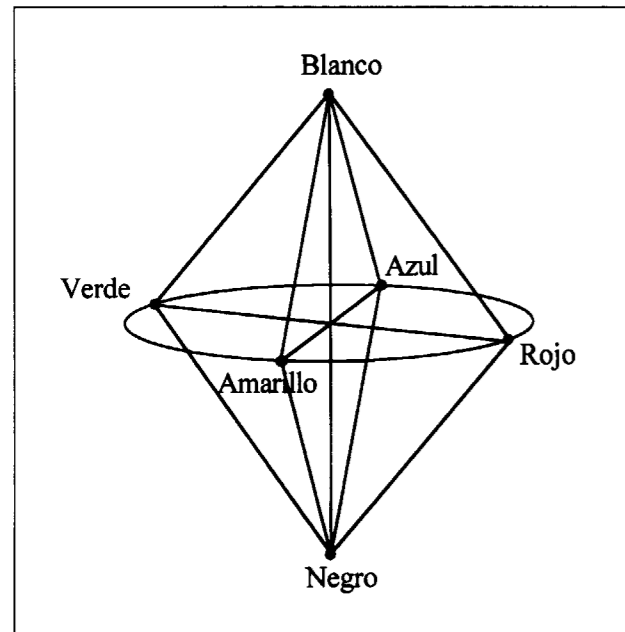


Figura 2. Sistema de coordenadas CIELab\*

La utilidad de espacio cromático CIELab\* radica en su mayor isometría para evaluar diferencias de color. Si consideramos dos pares de muestras con diferencias visuales de color semejantes, se comprueba que las distancias entre los pares de puntos en el espacio CIELab\* son así mismo equivalentes. Por ello, el criterio general para evaluar diferencias de color consiste en efectuar la cuantificación de esta diferencia mediante la distancia euclídea entre los respectivos puntos de representación de color en el espacio CIELab\*. La diferencia de color  $\Delta E^*$  puede expresarse mediante:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

EVALUACION DEL CAMBIO EN EL COLOR DE UN PAISAJE

Los distintos estímulos que se presentan al observar los colores de un paisaje no permiten

analizarlos como un conjunto de individualidades, sino más bien como una serie de contrastes entre colores distintos, tanto más apreciables cuanto más diferentes sean entre sí.

Para caracterizar el paisaje se parte de la proyección del campo visual del observador, sobre el cual se calculan las vecindades existentes entre los distintos vértices presentes. La determinación del rango de vecinos se logra mediante un algoritmo de cálculo (TIPPER, 1991) que permite calcular los polígonos de Thiessen (fig. 3). Dos vértices se consideran vecinos si tienen común al menos un lado de sus respectivos polígonos.

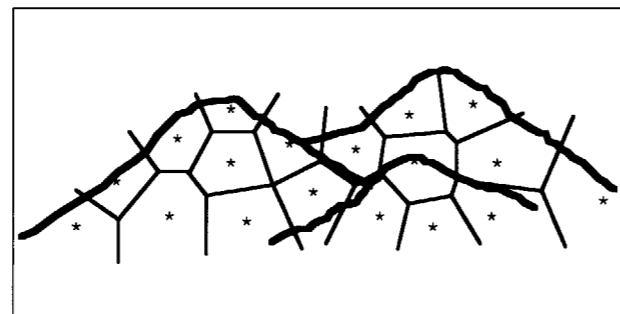


Figura 3. Polígonos de Thiessen

Los datos que se recogen de la proyección permiten rellenar la matriz de dependencia espacial del color (DEC), matriz de doble entrada en la que las filas y columnas son los colores presentes en el paisaje. Cada celda representa el número de veces que está presente el contraste entre esos colores para el observador.

En la tabla 1,  $k_{ij}$  es el número de veces presente el

Tabla 1 - Matriz de dependencia espacial del color

	Color 1	...	Color j	Color N
Color 1	$k_{11}$		$k_{1j}$	
...				
Color i	$k_{i1}$		$k_{ij}$	
Color N				$k_{n1}$

contraste entre los colores (I,J). Por su mismo diseño, la matriz es simétrica y la diagonal principal está formada por las parejas de colores idénticos.

Con esta matriz se puede caracterizar un paisaje observado, ya que muestra las relaciones existentes entre los distintos colores, la frecuencia de un contraste, o la proporción de vértices de un color.

Para evaluar la diferencia existente entre dos matrices, una previa y otra posterior a la alteración, es muy útil el análisis factorial de correspondencias (AFC), utilizando como distancia la Ji cuadrado ( $\chi^2$ ).

La  $\chi^2$  se basa en n poblaciones ( $H_1, \dots, H_n$ ) caracterizadas por m parámetros ( $A_1, \dots, A_m$ ), de las cuales se obtiene su tabla de contingencia:

Tabla 2 - Tabla de contingencia

	$A_1$	...	$A_m$	
$H_1$	$F_{11}$	...	$F_{1m}$	$f_{1H}$
...	...	...	...	...
$H_n$	$F_{n1}$	...	$F_{nm}$	$f_{nH}$
	$f_{A1}$	...	$f_{Am}$	N

siendo:

$$f_{iH} = \sum_{j=1}^m F_{ij} \quad f_{Aj} = \sum_{i=1}^n F_{ij}$$

La distancia Ji cuadrado entre dos poblaciones  $H_i, H_j$  será:

$$d^2(H_i, H_j) = \sum_{k=1}^m \frac{\left( \frac{f_{ik}}{f_{iH}} - \frac{f_{jk}}{f_{jH}} \right)^2}{f_{Ak}}$$

A partir de la matriz DEC se puede rellenar la siguiente, donde cada clase corresponde a un contraste posible:

Tabla 3 - Matriz de contrastes

	Clase 1	...	Clase K	
Situación Previa	$n_{11}$		$n_{1k}$	$n_{1T}$
Posterior	$n_{21}$		$n_{2k}$	$n_{2T}$
	$n_1$		$n_k$	$n_T$

donde:

- Clase k = Clase del contraste entre colores I/J
- K = número de clases.
- $n_{1k}$  = frecuencia absoluta de la clase k en la situación previa.
- $n_{2k}$  = frecuencia absoluta de la clase k en la situación posterior.
- $n_{1T}$  = número total de puntos en situación previa.
- $n_{2T}$  = número total de puntos en situación posterior.
- $n_k = n_{1k} + n_{2k}$
- $n_T = n_{1T} + n_{2T}$

En esta matriz no se recogen las parejas de un mismo color.

Como existen contrastes más apreciables que otros, para dar mayor peso a los que implican mayor diferencia de color, se modifica la distancia  $\chi^2$  introduciendo un ponderador función de la distancia euclídea entre ambos colores en el espacio CIELab\*.

Tras introducir la ponderación, la fórmula de la pseudo-distancia queda así:

$$C_1 = d^2(A, P) = \sum_{k=1}^K C_k \frac{\left( \frac{n_{1k}}{n_{1T}} - \frac{n_{2k}}{n_{2T}} \right)^2}{\frac{n_k}{n_T}}$$

siendo  $C_k$  el ponderador del contraste (i,j), igual a la distancia euclídea en el espacio CIELab\*.

Respecto al cielo, el color del mismo crea numerosos contrastes con la línea de horizonte, los cuales han de ser tenidos en cuenta. Para ello, y una vez obtenida la proyección del campo visual

del observador, se rellena por encima de la línea de cumbres con una serie de puntos regularmente dispuestos.

Una vez estudiados los contrastes, surge la duda de si se deben estudiar las parejas de colores idénticos. Estos no pueden ser introducidos en la fórmula anterior pues no existe criterio para darle un valor de ponderación. Se podría llevar a la equivocada idea de considerarlos tenidos en cuenta en el estudio del contraste, pero un simple ejemplo hará ver que sólo con los contrastes pueden no detectarse correctamente las modificaciones.

Supóngase una superficie ilimitada monocolor en la que se introducen dos posibles modificaciones, una consistente en un círculo de otro color y otra en un anillo estrecho de idéntico radio exterior al anterior.

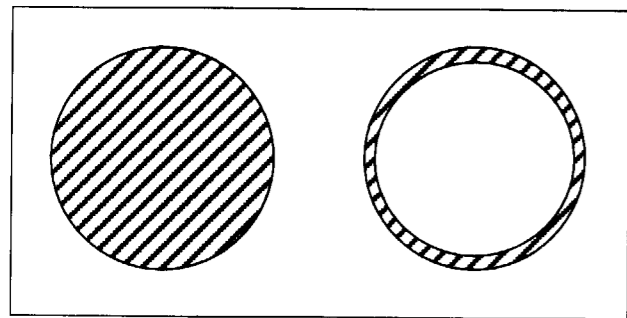


Figura 4. Color/Contraste

Si sólo se estudian los contrastes, la segunda figura mostrará un valor mayor, cuando la modificación introducida por el primer caso es más notable. Con este ejemplo se ve claro que además de la distancia entre contrastes (diferencia de heterogeneidad) debe calcularse la distancia entre colores (diferencia de homogeneidad). Para ello se utiliza la Ji cuadrado directamente, teniendo en cuenta de la matriz DEC sólo la diagonal principal (número de parejas del mismo color).

La razón de utilizar las parejas idénticas en vez de utilizar el número de celdas de cada color es evaluar el grado de homogeneización en un color existente en el paisaje. Cuanta mayor proporción

de parejas de un color dado existan, mayor homogeneidad tendrá el paisaje en dicho color.

Partiendo de la matriz de dependencia espacial del color se obtiene el número de contrastes entre colores idénticos.

Tabla 4 - Matriz de homogeneidad de color

	Clase 1	...	Clase K	
Situación Previa	$n_{11}$		$n_{1k}$	$n_{1T}$
Posterior	$n_{21}$		$n_{2k}$	$n_{2T}$
	$n_1$		$n_k$	$n_T$

donde:

Clase k = Clase de parejas de color k.  
K = número de clases.

$n_{1k}$  = frecuencia absoluta de la clase k en la situación previa.

$n_{2k}$  = frecuencia absoluta de la clase k en la situación posterior.

$n_{1T}$  = número total de puntos en situación previa.

$n_{2T}$  = número total de puntos en situación posterior.

$$n_k = n_{1k} + n_{2k}$$

$$n_T = n_{1T} + n_{2T}$$

En esta matriz sólo se encuentran las parejas formadas por colores idénticos.

En este caso la fórmula queda así:

$$C_2 = d^2(A, P) = \sum_{k=1}^K \frac{\left( \frac{n_{1k}}{n_{1T}} - \frac{n_{2k}}{n_{2T}} \right)^2}{\frac{n_k}{n_T}}$$

**MODIFICADORES DE LA APRECIACION DEL CAMBIO**

La apreciación que de un cambio puede hacer el observador va a depender en primer lugar de la distancia a la que éste se produzca. Cuanto más

alejada esté la alteración tanto menos se percibirá. Con el sistema utilizado dicho factor está incluido en los cálculos, pues a mayor proximidad del observador el polígono de Thiessen ocupará mayor proporción del campo visual, por lo que su cambio de color introducirá una mayor variación en la matriz DEC.

En cambio, en el caso de un campo visual lejano, el área asignada antes sólo al polígono de la alteración, estará ahora ocupada por multitud de pequeños polígonos, de los cuales uno sólo será alterado y el resto no. El número de contrastes con respecto al primer caso aumenta, pero no así el número de cambios, por lo que su influencia se ve reducida.

Finalmente, como función medidora del cambio sufrido por el color, se toma la suma de las dos distancias calculadas:

$$CO = C_1 + C_2$$

Como resultado del análisis se obtiene un valor de alteración asociado a cada posición de observación (celda del MDT), que servirá para calcular un mapa de isolíneas dando información sobre los lugares que aprecian más el impacto de un proyecto concreto.

Partiendo de estos valores, y buscando comparar distintas alternativas en el diseño de la explotación se utiliza otro parámetro medidor:

$$CO = \sum_{i=1}^N CO_i \times s_i$$

donde:

CO = Alteración visual global del color.

N = Nº total de celdas comprendidas en las cuencas visuales previa y posterior.

CO<sub>i</sub> = Alteración visual del color para el observador i.

s<sub>i</sub> = Superficie de la celda asignada al observador i.

Este valor global incluye la superficie de las celdas para independizar su valor de la resolución del MDT utilizado. Aunque el estudio se realice bajo distintas mallas el valor global será similar,

siendo más preciso cuanto mayor resolución se utilice (menor tamaño de celda).

**RESULTADOS DE UN CASO PRACTICO**

Como análisis del modelo, se aplica a un lugar real en el que se simulan distintos diseños de una explotación. Para poder realizar un estudio completo de la influencia del color se suponen en la zona en explotación distintos tipos de roca, con sus respectivos colores asociados. De la misma manera se simula una restauración del área mediante vegetación ya presente en la zona con anterioridad.

Aparte de los resultados globales se analizan diversos valores puntuales, denominados observadores 1 a 3, estando el observador 1 en el borde de la explotación y siendo el observador 3 el más alejado. De esta manera es posible analizar la influencia tanto del diseño de la explotación como del color del material extraído, así como la atenuación del impacto visual con la distancia de observación.

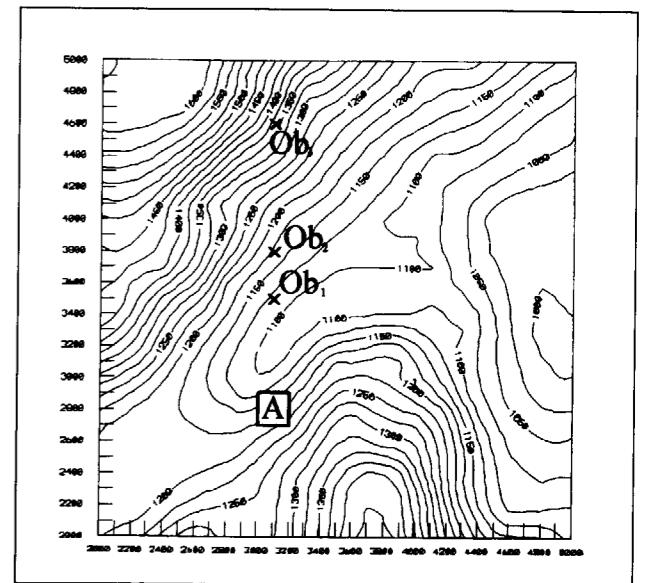


Figura 5. Area seleccionada

Además de los datos topográficos, es necesario conocer los colores presentes en la zona a estudio, conseguidos a partir del mapa de usos del suelo y de la realización de estudios in situ.

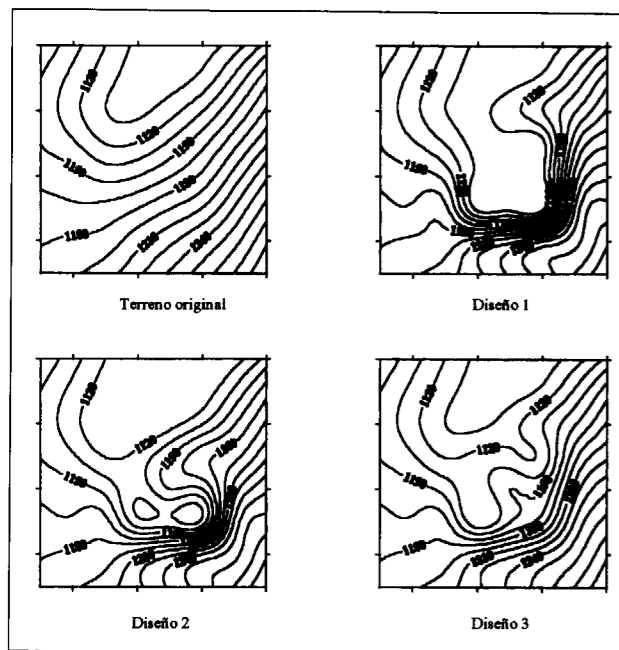


Figura 6. Diseños de explotación

Comparando con la Norma UNE 48-103-94 se asigna un color a la vegetación y utilizando el trabajo del Instituto Tecnológico GeoMinero de España para asignar un color a las distintas rocas (ITGE 1994), se dispone finalmente de unas coordenadas CIELab\* para cada color presente en el paisaje. Un factor a tener en cuenta es la variación estacional de la vegetación, por lo que a la hora de asignar colores debe tenerse en cuenta el cambio de estación, variando la fragilidad visual del paisaje.

Los distintos diseños se estudian tanto globalmente como mediante los valores puntuales para los observadores. Dentro de cada diseño se analizan por separado distintos supuestos, en los que el color asignado a la alteración va variando desde distintos tipos de granito hasta una caliza. Finalmente se analizan también los resultados obtenidos ante una restauración de la alteración mediante vegetación preexistente en el área (pastizal y matorral).

#### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Representando gráficamente los resultados obtenidos:

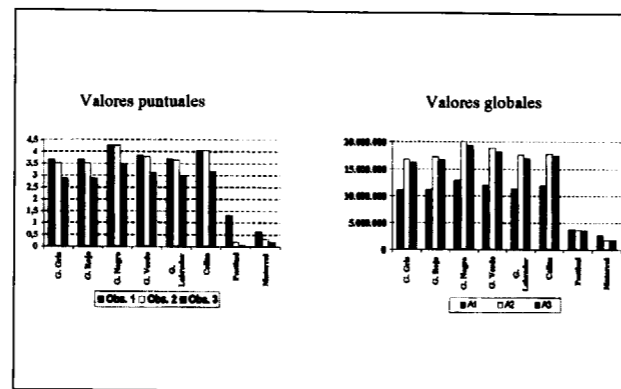


Figura 7. Valores de alteración en el color

Analizando los resultados obtenidos, tanto para los valores puntuales como globales, se puede comprobar el buen comportamiento del sistema:

\* Los valores puntuales en los observadores disminuyen según estos se alejan de la alteración.

\* Las menores alteraciones introducidas se dan cuando se restaura con materiales ya preexistentes en la zona (pastizal y matorral).

\* De los distintos diseños el que más altera los colores es el A2. Lo que en un principio parece ser una incongruencia afianza más la confianza en el sistema, pues en el diseño A2 aparece un promontorio muy visible en su parte Norte, lo que realza la alteración.

#### CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados se comprueba el buen comportamiento del modelo lo que permite exponer las siguientes conclusiones:

\* El método desarrollado detecta los cambios introducidos en el color de un paisaje.

\* La utilización de los campos visuales del observador repercute en una gran sensibilidad del sistema.

\* La utilización de coordenadas esféricas como sistema de referencia, acerca más el análisis a la visión real, solventando la problemática de la distancia.

\* El análisis de los contrastes entre celdas colindantes permite una mejor caracterización del campo visual.

El método desarrollado no queda cerrado tras estos trabajos, muy al contrario abre una nueva vía de investigación que, tras los resultados obtenidos, permite albergar esperanzas de un gran futuro.

#### REFERENCIAS

AGUILO, M. et al (1993).; "Guía para la elaboración de estudios del medio físico". Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente. M.O.P.T.

BERNALDEZ, F.G. & GALLARDO, D. (1983); "Determinación de los factores que intervienen en las preferencias paisajísticas". Arbor 518-519. pags 15-43.

BURNS, S. (1990); "The Munsell color system in fundamental

color space". Color research and application. Vol. 15, Number 1, February.

FERNANDEZ GUTIERREZ DEL ALAMO, L. (1995); "Contribución a la metodología de evaluación del impacto visual en explotaciones mineras de superficie". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

INSTITUTO TECNOLOGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. ITGE. (1994); "Análisis comparado de la medida del color en rocas ornamentales mediante espectrofotómetro y colorímetro triestímulo. Aplicación a la caracterización de rocas". Convenio Marco de Colaboración entre el ITGE y la Fundación Gómez Pardo. Diciembre.

IVERSON, W.D. (1975); "Assensing Landscape Resources: A proposed model.". Zube y col (Eds.), págs 274-288.

LOZANO, R.D.(1978); "El color y su medición". Editorial AmericaLee.

NORMA UNE 48-103-94. Asociación Española de Normalización y Certificación, 1994.

TIPPER, J.C. (1991); "Fortran programs to construct the planar VORONOI diagram". Computers & Geosciences. Vol17. nº 5 pags. 597-632.

Original recibido: Diciembre 1997.

Original aceptado: Febrero 1998.

# ANALISIS GEOMETRICO DE SISTEMAS DE FRACTURACION EN CANTERAS DE ROCAS ORNAMENTALES. APLICACION DE ANALISIS FRACTAL EN LA CANTERA DE "EL VENERO" (CADALSO DE LOS VIDRIOS, MADRID)<sup>(1)</sup>.

Por P. GUMIEL (\*) y J. M. BALTUILLE (\*)

## RESUMEN

Uno de los criterios de mayor incidencia en la explotabilidad de un yacimiento de Roca Ornamental es el estado de fracturación del mismo. La caracterización geométrica y análisis de las propiedades de escalado de muchos sistemas de fractura, es una metodología de trabajo que se ha empezado a aplicar, hace una decena de años, en la discriminación de sistemas filonianos y en general, en la exploración de yacimientos minerales. Igualmente, estas técnicas se están aplicando con éxito en la búsqueda y localización de yacimientos de petróleo y gas.

Se ha comprobado que el comportamiento de los diferentes tipos de discontinuidades de un macizo rocoso (fracturas, diaclasas, venas, diques, etc.), en muchas ocasiones, obedece leyes de escalado fractal en varios órdenes de magnitud. Algunas propiedades de los sistemas de fractura, como apertura, espaciado, longitud de trazas, etc., muestra distribuciones fractales o multifractales. En base al análisis de estas propiedades, además del conocimiento de su distribución e invarianza al cambio de escala, se puede obtener información sobre el grado de predicción de una determinada variable, lo que tiene gran importancia de cara a la prospección y explotación.

En este trabajo, se presenta un ensayo de aplicación de esta metodología al estudio de un macizo granítico en explotación, para poner de manifiesto las posibilidades que el método tiene, de cara a obtener una extracción más racional.

*Palabras clave:* Granitos, Canteras, Rocas Ornamentales, Fractales, Geometría, Fracturas.

## ABSTRACT

One of the greater incidence criteria in the exploitability of an ornamental rock deposit is the state of fracturing. The geometrical characterization and fractal scaling of many fracture systems, it is a work methodology that it has been begun to apply, no more than ten years ago, to discriminate vein systems, and in prospectivity or mineral deposits exploration. Equally, these techniques are being applying with success in the search, and location of oil-deposits and gas.

It has been proven that the behaviour of the different types of discontinuities of a rock massif (fractures, joints, veins, dikes, etc.), in many occasions, follows fractal scaling laws in several orders of magnitude. Some properties of the fracture systems, as aperture, spacing, trace length, etc., show fractal distributions or are multifractals. In base to the analysis of these properties, in addition to the knowledge of their distribution, and scale-invariance, it can be obtained information on the prediction degree from a given variable, what may be of great importance to the exploration and rational opencast working.

In this work, is presented an attempt of application of this methodology to the study of a granitic massif on operation, to make clear the possibilities that the method has, to obtain a more rational extraction.

*Key words:* Granites, Quarries, Ornamental Rocks, Fractals, Geometry, Fractures.

<sup>(1)</sup> Una versión previa fué presentada como comunicación oral en el II Congreso Internacional de La Piedra, celebrado en Madrid en Mayo de 1998.

(\*) Dir. Recursos Minerales, Instituto Tecnológico Geominero de España, Ríos Rosas 23, 28003, Madrid (Spain).

## INTRODUCCION

El municipio de Cadalso de los Vidrios, situado al SE de la provincia de Madrid, es una zona con una larga tradición de explotación del granito como roca ornamental. Inicialmente de una forma artesanal, mediante pequeñas canteras que eran beneficiadas por canteros locales que extraían las capas ("cáscaras") más superficiales del granito. Finalmente, hace una veintena de años, se establecieron en el municipio varias empresas graniteras con el fin de iniciar una actividad industrial moderna acorde con los nuevos derroteros que tomaba en España y en el mundo, la industria de las Rocas Ornamentales; en la actualidad existe una docena de explotaciones en el ámbito del municipio.

En el paraje de El Venero, situado 1 km al NE de Cadalso de los Vidrios, se encuentra la explotación de granito, propiedad de MARCELINO MARTINEZ, S.L., donde se han tomado los datos con los que se ha elaborado este trabajo. Esta sociedad se dedica a la comercialización de bloques y, en la actualidad, dispone de 10 canteras en explotación en todo el término municipal.

En la cantera se explota la variedad denominada **Blanco Cristal**. Se trata de una granodiorita biotítica, de grano medio a fino y textura alotriomórfica, pero que podría englobarse también dentro de la denominación más genérica de leucogranito. Los minerales principales son cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Los secundarios son sericita y clorita, y como minerales accesorios se encuentran clorita, moscovita, circón y opacos (ITGE, 1990).

Entre los trabajos previos de caracterización geométrica de parámetros estructurales y de las redes de fracturación en canteras de rocas ornamentales, de cara a la optimización de las explotaciones, cabe citar a TABOADA CASTRO et al. (1994), DINIS DA GAMA y BASTOS (1994) y CARREON-FREYRE et al. (1996). En este trabajo se presenta un ensayo de aplicación de técnicas de análisis geométrico y leyes de escalado de sistemas de fractura, al estudio de un macizo granítico en explotación. La metodología se basa en la caracterización fractal de aquellas propiedades, como apertura y espaciado, que tienen especial incidencia en la definición de bloques explotables, de cara a obtener una extracción más racional.

## ESTUDIO DE LA FRACTURACION A DIFERENTES ESCALAS: ANALISIS DE LINEAMIENTOS EN FOTOGRAFIA AEREA.

Con objeto de analizar las propiedades de escalado de los sistemas de fracturas existentes en la zona de estudio, se ha realizado un análisis de la fracturación a diferentes escalas. Macroscópicamente, se han analizado los lineamientos que se observan en la fotografía aérea a escala 1:30.000, de los alrededores de la Cantera de El Venero. Se ha llevado a cabo un análisis direccional con objeto de discriminar las principales orientaciones que se reconocen en la zona. Se han obtenido mapas de contornos de *frecuencia* (número de fracturas), de *densidad direccional* (longitudes de segmentos de fracturas por celda), y del *número de intersecciones* interfracturas, en una malla de dimensiones 300 x 300m, que es muy apropiada para tener una visión global de la zona de estudio. El análisis de lineamientos se ha realizado utilizando los módulos *Lineations de Gridzo (Paquete Rockware -vs. 7.0-)*, generando mallados independientes, según se considere, frecuencia, densidad o número de intersecciones. Posteriormente, los ficheros se han transferido a *Surfer 32*, en donde se obtienen los mapas de contornos definitivos. El método de interpolación utilizado en la construcción de cada mallado ha sido el del "inverso de la distancia al cuadrado".

Del análisis direccional de los lineamientos (Figura 1), se deduce que la distribución de máximos y mínimos delimita con precisión el trazado de los principales lineamientos observados en la fotografía aérea, y que generalmente coinciden con las fracturas de la zona. Se confirma que hay una buena correlación entre frecuencia, densidad y número de intersecciones de los planos de los mismos, destacando en importancia cuantitativa el grupo de orientación NNE-SSO  $-N10^{\circ}/20^{\circ}E-$  (14%). El resto de orientaciones muestra un abanico de orientación NE-SO, con otro máximo secundario en dirección ENE-OSO ( $N60^{\circ}-70^{\circ}E$ ). Hay que resaltar que de este análisis, ya se pone de manifiesto que la Cantera de El Venero se sitúa en una zona de menor frecuencia y densidad de fracturas, lo que es un factor de discriminación a la hora de buscar posibles zonas de extracción.

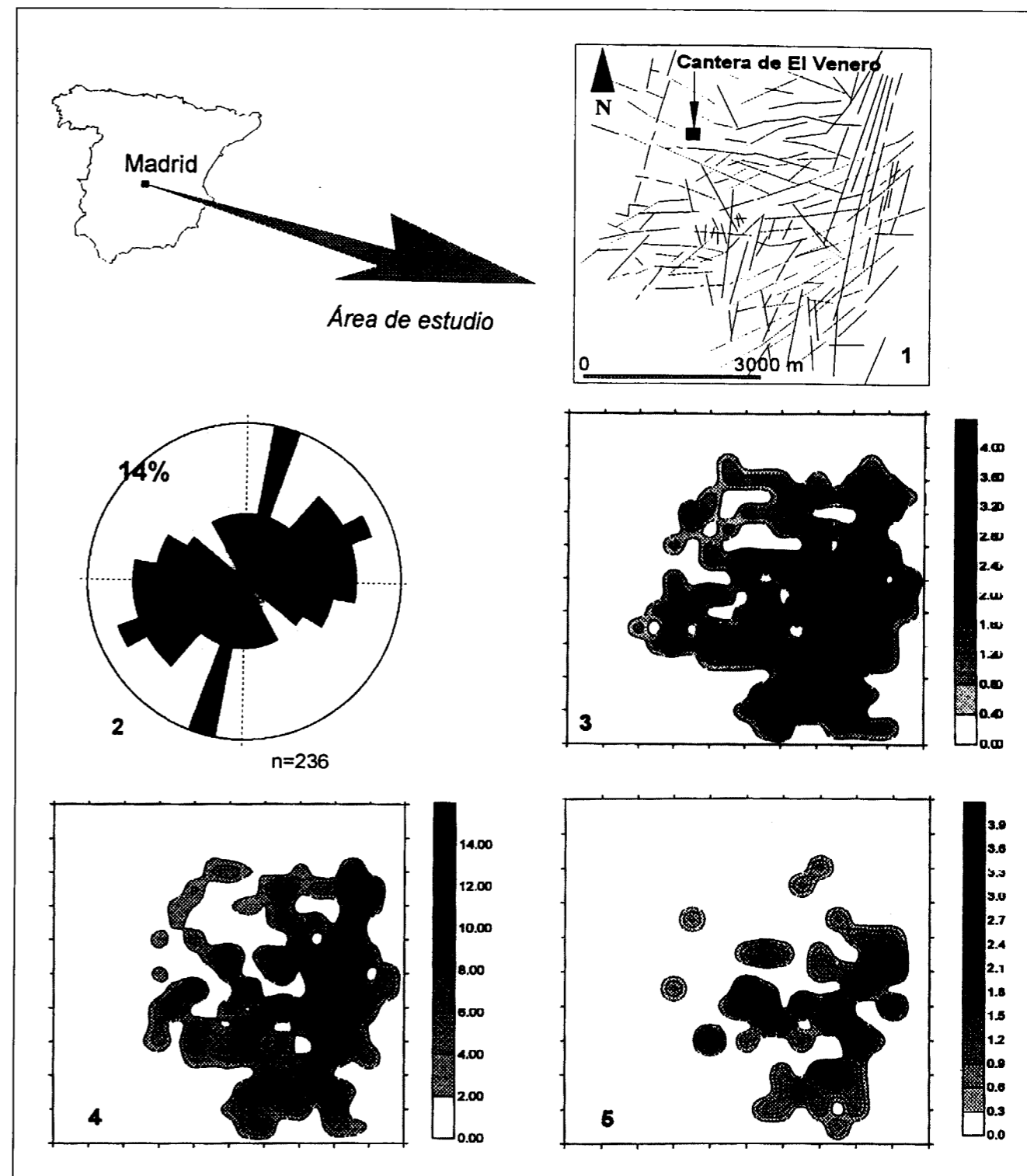


Figura 1: 1-Mapa de lineamientos -fracturas-; 2-Diagrama en rosa de orientaciones (intervalo de clase 10°); 3-Contornos de frecuencia; 4-Contornos de densidad (longitud acumulada de segmentos por celda); 5-Contornos de intersecciones de lineamientos. Alrededores de la Cantera de El Venero, Cadalso de los Vidrios (Madrid). Malla de 300x300 m. Equidistancias de isovalores: 0,4, 2 y 0,3 respectivamente.

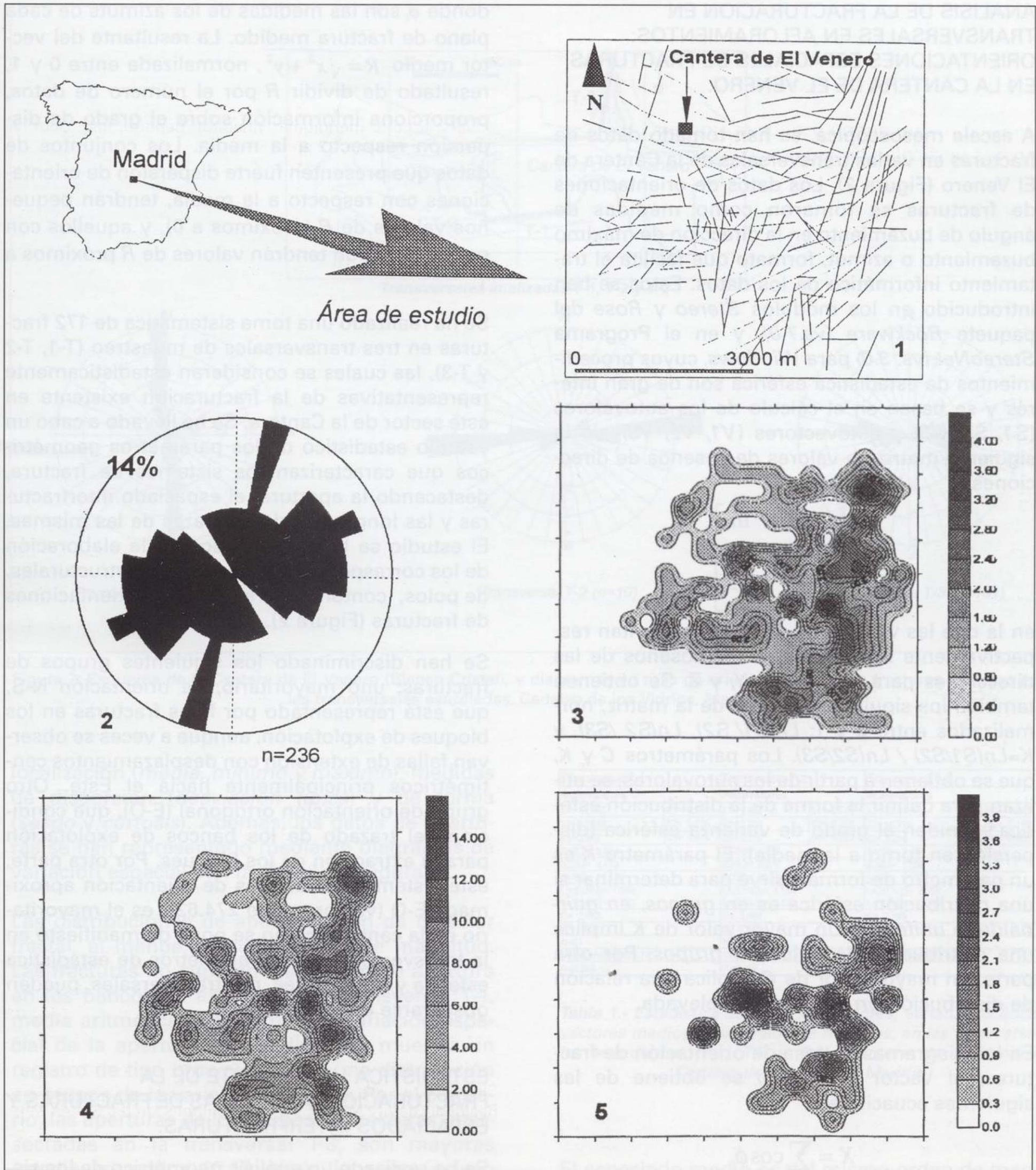


Figura 1: 1-Mapa de lineamientos -fracturas-; 2-Diagrama en rosa de orientaciones (intervalo de clase  $10^\circ$ ); 3-Contornos de frecuencia; 4-Contornos de densidad (longitud acumulada de segmentos por celda); 5-Contornos de intersecciones de lineamientos. Alrededores de la Cantera de El Venero, Cadalso de los Vidrios (Madrid). Malla de  $300 \times 300$  m. Equidistancias de isovalores; 0.4, 2 y 0.3 respectivamente.



**ANALISIS DE LA FRACTURACION EN TRANSVERSALES EN AFLORAMIENTOS: ORIENTACIONES ESPACIALES DE FRACTURAS EN LA CANTERA DE EL VENERO.**

A escala mesoscópica, se han tomado datos de fracturas en varias transversales de la Cantera de El Venero (Figura 2). Los datos de orientaciones de fracturas se tomaron como medidas de ángulo de buzamiento en la dirección de máximo buzamiento o azimut, formato que facilita el tratamiento informático de los datos. Estos se han introducido en los módulos *Stereo* y *Rose* del paquete *Rockware (vs.7.0)*, y en el Programa *StereoNet (vs. 3.0)* para *Windows*, cuyos procedimientos de estadística esférica son de gran interés y se basan en el cálculo de los autovalores (S1, S2, S3) y autovectores (V1, V2, V3), de la siguiente matriz de valores de cosenos de direcciones:

$$\begin{bmatrix} l^2 & lm & ln \\ ml & m^2 & mn \\ nl & nm & n^2 \end{bmatrix}$$

en la que las variables *l*, *m* y *n* representan respectivamente los valores de los cosenos de las direcciones para los ejes X, Y, y Z. Se obtienen también los siguientes valores de la matriz, normalizados entre 0 y 1:  $Ln(S1/S2)$ ,  $Ln(S2/S3)$ , y  $K=Ln(S1/S2) / Ln(S2/S3)$ . Los parámetros *C* y *K*, que se obtienen a partir de los autovalores, se utilizan para definir la forma de la distribución esférica, y miden el grado de varianza esférica (dispersión en torno a la media). El parámetro *K* es un parámetro de forma y sirve para determinar si una distribución esférica es en *grupos*, en *guirnalda*, o *uniforme*. Un mayor valor de *K* implica una distribución de polos en *grupos*. Por otra parte, un mayor valor de *C* implica una relación de distribución *grupo/guirnalda* elevada.

En los diagramas en rosa de orientación de fracturas, el Vector Medio ( $\phi$ ) se obtiene de las siguientes ecuaciones;

$$X = \sum \cos \phi_i$$

$$Y = \sum \sen \phi_i$$

$$\phi = \arctg(X/Y)$$

donde  $\phi_i$  son las medidas de los azimuts de cada plano de fractura medido. La resultante del vector medio  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ , normalizada entre 0 y 1, resultado de dividir *R* por el número de datos, proporciona información sobre el grado de dispersión respecto a la media. Los conjuntos de datos que presenten fuerte dispersión de orientaciones con respecto a la media, tendrán pequeños valores de *R* (próximos a 0), y aquellos con poca dispersión tendrán valores de *R* próximos a 1.

Se ha realizado una toma sistemática de 172 fracturas en tres transversales de muestreo (T-1, T-2 y T-3), las cuales se consideran estadísticamente representativas de la fracturación existente en este sector de la Cantera. Se ha llevado a cabo un estudio estadístico de los parámetros geométricos que caracterizan los sistemas de fractura, destacando la apertura, el espaciado interfisuras y las longitudes de las trazas de las mismas. El estudio se ha completado con la elaboración de los correspondientes diagramas estructurales, de polos, contornos y "en rosa" de orientaciones de fracturas (Figura 2).

Se han discriminado los siguientes grupos de fracturas: uno mayoritario, de orientación N-S, que está representado por finas fracturas en los bloques de explotación, aunque a veces se observan fallas de extensión con desplazamientos centimétricos principalmente hacia el Este. Otro grupo de orientación ortogonal (E-O), que condiciona el trazado de los bancos de explotación para la extracción de los bloques. Por otra parte, este sistema de fracturas de orientación aproximada E-O (vector medio 274.62°) es el mayoritario en la cantera, como se pone de manifiesto en la transversal T-3. Los parámetros de estadística esférica y autovalores, por transversales, pueden observarse en la Tabla 1.

**ESTADISTICA UNIVARIANTE DE LA FRACTURACION. APERTURAS DE FRACTURAS Y ESPACIADOS INTERFRACTURAS.**

Se ha realizado un análisis geométrico de los sistemas de fracturas intersectadas en las tres transversales seleccionadas de toma de datos en la Cantera. Los estadísticos básicos de las aperturas y espaciados interfisuras incluyen medidas de

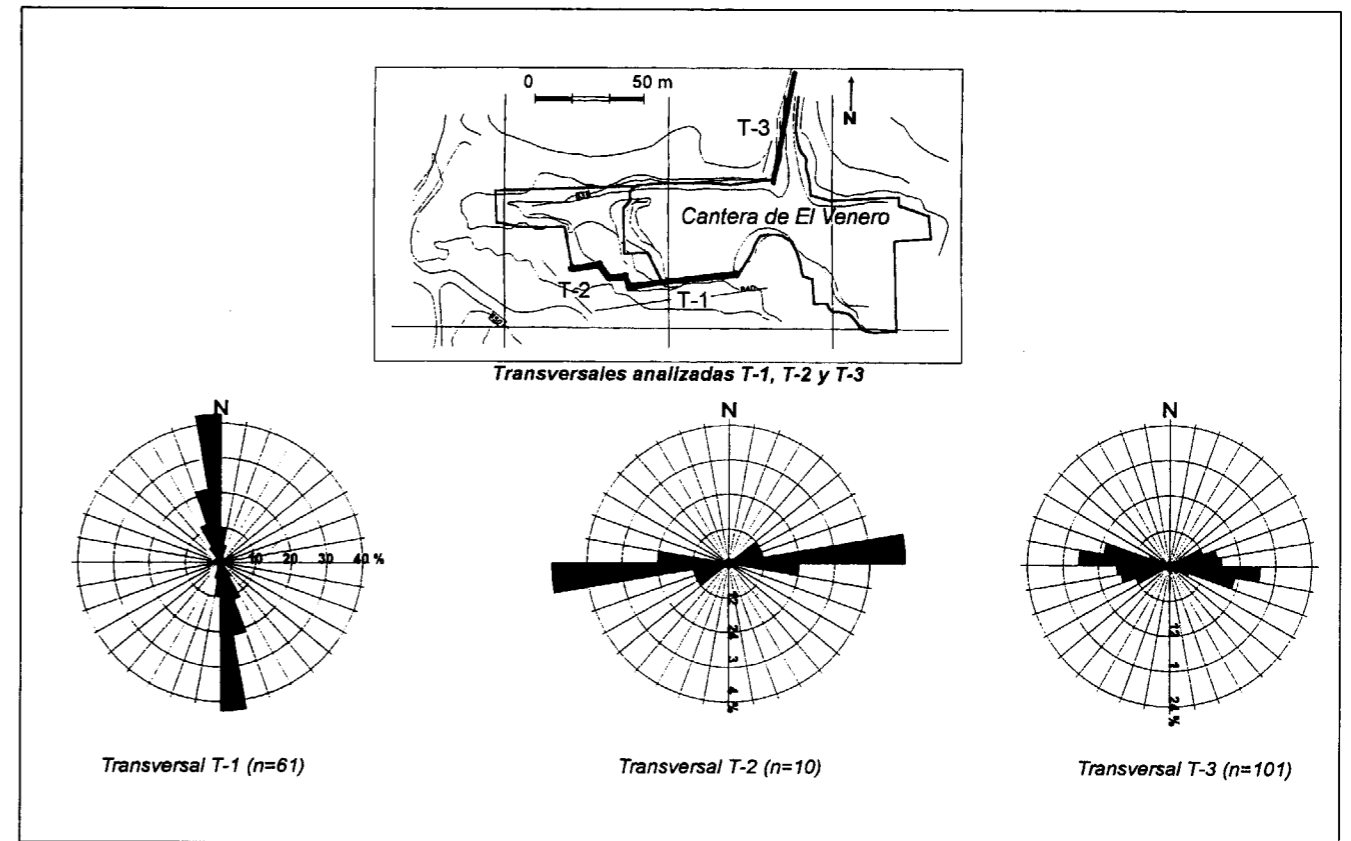


Figura 2: Esquema de la Cantera de El Venero (Blanco Cristal), y diagramas en rosa de orientaciones de las fracturas medidas en las transversales estudiadas. Cadalso de los Vidrios, Madrid.

localización (*media*, *mínimo* y *máximo*), medidas de dispersión (*desviación típica*) y de forma (*sesgo* y *curtosis*). Además, los datos de aperturas se han representado mediante diagramas de variación espacial con la distancia (Figura 3).

Las distribuciones de aperturas son de carácter fractal, al menos en dos órdenes de magnitud. Las fracturas no superan los 10 mm de apertura en los bancos de explotación, (transversal T-1, media aritmética 2.38 mm) y la variación espacial de la apertura con la distancia muestra un registro de tipo browniano, con una distribución en grupos de la variable (Figura 3). Por el contrario, las aperturas de los grupos de fracturas intersectadas en la transversal T-3, son mayores (media aritmética 10.19 mm), llegando incluso hasta 100mm, y la variación espacial con la distancia muestra un registro más uniforme, no superando los 20 mm, excepto el valor puntual de 100 mm (Figura 3).

Transversal T-1		Transversal T-2		Transversal T-3	
Autovalores		Autovalores		Autovalores	
λ1= 45.745	S1= 0.750	λ1= 7.461	S1= 0.748	λ1= 81.811	S1= 0.810
λ2= 12.588	S2= 0.208	λ2= 2.290	S2= 0.229	λ2= 10.976	S2= 0.109
λ3= 2.667	S3= 0.044	λ3= 0.230	S3= 0.023	λ3= 6.214	S3= 0.061
S1/S2= 3.634		S1/S2= 3.267		S1/S2= 7.454	
S2/S3= 4.719		S2/S3= 9.978		S2/S3= 1.336	
S1/S3= 17.150		S1/S3= 32.594		S1/S3= 9.960	
Ln(S1/S2)= 1.290		Ln(S1/S2)= 1.184		Ln(S1/S2)= 2.009	
Ln(S2/S3)= 1.552		Ln(S2/S3)= 2.300		Ln(S2/S3)= 0.260	
C= 2.842		C= 3.484		C= 2.299	
K= 0.832		K= 0.515		K= 6.930	
N=61		N= 10		N=101	
Vector Medio= 170.74°		Vector Medio= 276.77°		Vector Medio= 274.62°	
R=0.685		R=0.419		R=0.397	

Tabla 1.- Estadística esférica. Autovalores, varianza esférica, vectores medios y dispersión de fracturas, en las transversales estudiadas (T-1, T-2 y T-3). Cantera de El Venero, Cadalso de Los Vidrios, Madrid.

El espaciado medio es del mismo orden de magnitud, (entre 0.60m en la transversal T-3 y 1.43m en los bloques de explotación de la transversal T-1). Otros parámetros estadísticos pueden observarse en la Tabla 2.

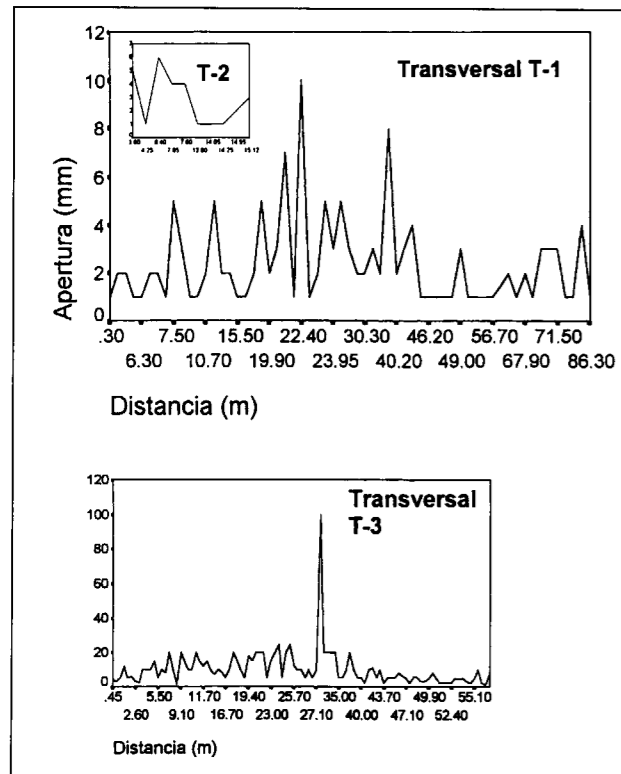


Figura 3: Diagramas de variación espacial con la distancia, de las aperturas de las fracturas, en las transversales estudiadas Cadalso de los Vídrios, Madrid.

#### APLICACION DEL ANALISIS FRACTAL AL ESTUDIO DE LA ORGANIZACION GEOMETRICA Y LEYES DE ESCALADO DE LOS GRUPOS DE FRACTURAS DE LA CANTERA.

Un fractal es un objeto o proceso que muestra similares características a diferentes escalas, y por lo tanto, es invariante al cambio de escala. Muchos fenómenos naturales son fractales y éstos pueden ser autosimilares o autoafines y una consecuencia importante de dicha fractalidad, es que se puede obtener información a una determinada escala, que sea de interés para otra. Generalmente, tales propiedades siguen distribuciones exponenciales (hiperbólicas), donde la propiedad ( $P$ ) está relacionada con el tamaño ( $t$ ) mediante una ecuación  $P=C t^{-D}$ , y el exponente,  $D$ , es frecuentemente la dimensión fractal del sistema. Dimensión fractal ( $D$ ) por tanto y en sentido genérico, es un número que sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación

Estadísticos básicos	Apertura (mm)			Espaciados (m)		
	T-1	T-2	T-3	T-1	T-2	T-3
Nº datos	81	10	101	80	9	100
Valor máximo	10,0	6,0	100,0	9,2	5,0	2,8
Valor mínimo	1,0	1,0	1,0	0,05	0,15	0,05
Media	2,38	2,80	10,19	1,43	1,28	0,80
Desviación típica	1,84	1,87	10,9	1,69	1,53	0,52
Mediana	5,5	3,5	50,5	4,62	2,57	1,32
Moda	1,00	1,00	5,0	0,25	0,85	0,40
Meda geométrica	1,91	0,34	7,40	0,75	0,72	0,42
Sesgo	2,00	0,38	5,57	2,32	1,64	2,13
Curtosis	7,48	1,57	45,43	9,48	4,39	8,12
Suma de espaciados	145,5	28,0	1030	88,0	11,52	50,56

Tabla 2.- Estadística univariante. Estadísticos básicos de las aperturas y espaciados interfracturas, en las transversales estudiadas, incluyendo medidas de localización, de dispersión y de forma.

de un conjunto geométrico, o de un objeto u objetos naturales.

La naturaleza fractal de un gran número de fenómenos asociados con procesos de fracturación, da como resultado distribuciones exponenciales, por ejemplo, la magnitud de los terremotos (GUTENBERG y RITCHER, 1954; TURCOTTE, 1989), la fragmentación (SAMMIS et al., 1986; SAMMIS y BIEGEL, 1989), y los desplazamientos de fallas (KAKIMI, 1980; SCHOLZ y COWIE, 1990; WALSH et al., 1991). Igualmente, tonelaje y ley de algunos yacimientos minerales presentan relaciones fractales (TURCOTTE, 1986 y 1989). En base a los estudios iniciales, sobre la aplicación de técnicas de análisis fractal a la ordenación irregular de los sistemas filonianos auríferos del área de La Codosera, Badajoz (GUMIEL et al., 1992; SANDERSON et al., 1994), y a los resultados obtenidos de la aplicación de estas técnicas, a otros yacimientos filonianos de wolframio y estaño del Macizo Hespérico (GUMIEL y SANDERSON, 1994), y de uranio y apatito (GUMIEL et al., 1996), junto con los datos obtenidos del análisis geométrico de los sistemas de fracturación (SILVA, 1996), se ha comprobado que la potencia de las venas, o el espaciado o apertura de las fracturas, generalmente siguen distribuciones exponenciales, que pueden ser interpretadas en términos de escalado fractal autoafín.

#### ANALISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE ESPACIADOS INTERFRACTURAS. METODOLOGIA Y RESULTADOS OBTENIDOS.

En estudios de sistemas de fracturas se ha observado que las distribuciones de espaciados pue-

den ser lognormales (NARR & SUPPE, 1991), exponenciales negativas (PRIEST & HUDSON, 1976; LA POINTE & HUDSON 1985, VILLAESCUSA & BROWN, 1990) y quizás menos frecuentes, las distribuciones normales (HUANG & ANGELIER, 1989). Recientemente, GUMIEL et al., (1995) encuentran que las distribuciones de espaciados en algunos conjuntos de fracturas, que aprovechan sistemas filonianos en el ámbito del Macizo Hespérico, presentan distribuciones de espaciados hiperbólicas -fractales-, a las que se les suma, una cierta componente aleatoria (distribuciones exponenciales negativas), la cual puede ser debida a irregularidades de algunos sistemas individuales, a la posición relativa de las fracturas con respecto a estructuras mayores, (fallas, zonas de cizalla etc.), o al carácter multifractal de estos sistemas.

El método de trabajo en el campo consiste en el registro de todos los centros geométricos de las fracturas, en su punto de intersección con la transversal de toma de datos. Se miden sistemáticamente todas las aperturas y las longitudes de espaciado interfractura, y al mismo tiempo, se anota la orientación espacial de cada fractura, así como, cualquier característica geológica de interés, que pueda ser útil en el estudio geométrico. Todos los datos obtenidos son debidamente registrados e informatizados y el análisis de las distribuciones de espaciados y/o aperturas se realiza utilizando un programa específico de cálculo (SANDERSON cont. pers.).

Se han generado diagramas bilogármticos  $\log(N) - \log(\text{espaciado})$ , siendo  $N$  la frecuencia acumulada del número de fracturas, así como diagramas de frecuencia acumulada (%) versus espaciado (Figura 4 / 1, 2 y 3), para ver a qué tipo de distribuciones se ajustan los espaciados interfracturas en la Cantera de El Venero. La figura 4/3 consta, a su vez, de 4 diagramas; los dos primeros (1) y (2) representan la proyección de la frecuencia acumulada de los espaciados (en %), en una escala normal, versus el espaciado en metros (1) y el log-espaciado (2), lo que va a producir una línea recta de ajuste, si la distribución es normal (1) o lognormal (2) respectivamente. Si se proyectan estos mismos datos, pero con la frecuencia acumulada en escala logarítmica, frente al espaciado, en una escala lineal (3) o logarítmica (4), se producirá una línea recta si la distri-

bución es *exponencial negativa* (3) o *hiperbólica -fractal-* (4), sujeto a efectos de truncación (PICKERING et al., 1995), que generalmente, se traducen en la falta de datos de aquellos espaciados muy pequeños, efecto que suele suceder por debajo de 0.1m. La longitud finita de las transversales introduce otro efecto de límite superior (censoring), en aquellos valores grandes (espaciados grandes), cuya probabilidad de muestreo es baja. Censoring y truncación han sido corregidos utilizando los métodos desarrollados por PICKERING et al. (1995).

La interpretación de los resultados pone de manifiesto que, la distribución de espaciados interfracturas en la transversal T-1 (Figura 4/1), es lognormal (diagrama 2, Figura 4/3), con una componente fractal o multifractal. Esta tendencia se manifiesta por el menor grado de verticalización de la recta de ajuste en el diagrama  $\log(N) - \log(\text{espaciado})$  -Figura 4/1, en un rango comprendido entre 0.2 y 1.5m. En la transversal T-3, la distribución de espaciados es mayoritariamente de carácter hiperbólica (fractal) -Figura 4/2-, con una recta de ajuste de mayor pendiente que en la anterior transversal.

Como ha sido sugerido por PRIEST (1993), el que la distribución de espaciados interfracturas sea lognormal, implica que alguna longitud característica interviene en las propiedades de escalado. Por el contrario, el que la distribución sea hiperbólica supone una invarianza al cambio de escala, es decir, es típicamente fractal.

Los datos de espaciados en la Cantera sugieren que, en conjunto, las fracturas existentes van a tener distribuciones fractales o más concretamente multifractales, siendo por tanto la invarianza al cambio de escala su principal característica. Pero algunos sistemas individualizados de fracturas pueden llegar a tener alguna longitud-escalar característica de espaciado, y presentar distribuciones de tipo lognormal, lo cual supone un importante criterio de discriminación. Esto está de acuerdo con recientes análisis de diaclasas y fallas realizados por GILLESPIE et al. (1993).

#### CONCLUSIONES

Hay que resaltar que en la Cantera de El Venero, la fracturación regional muestra distribuciones

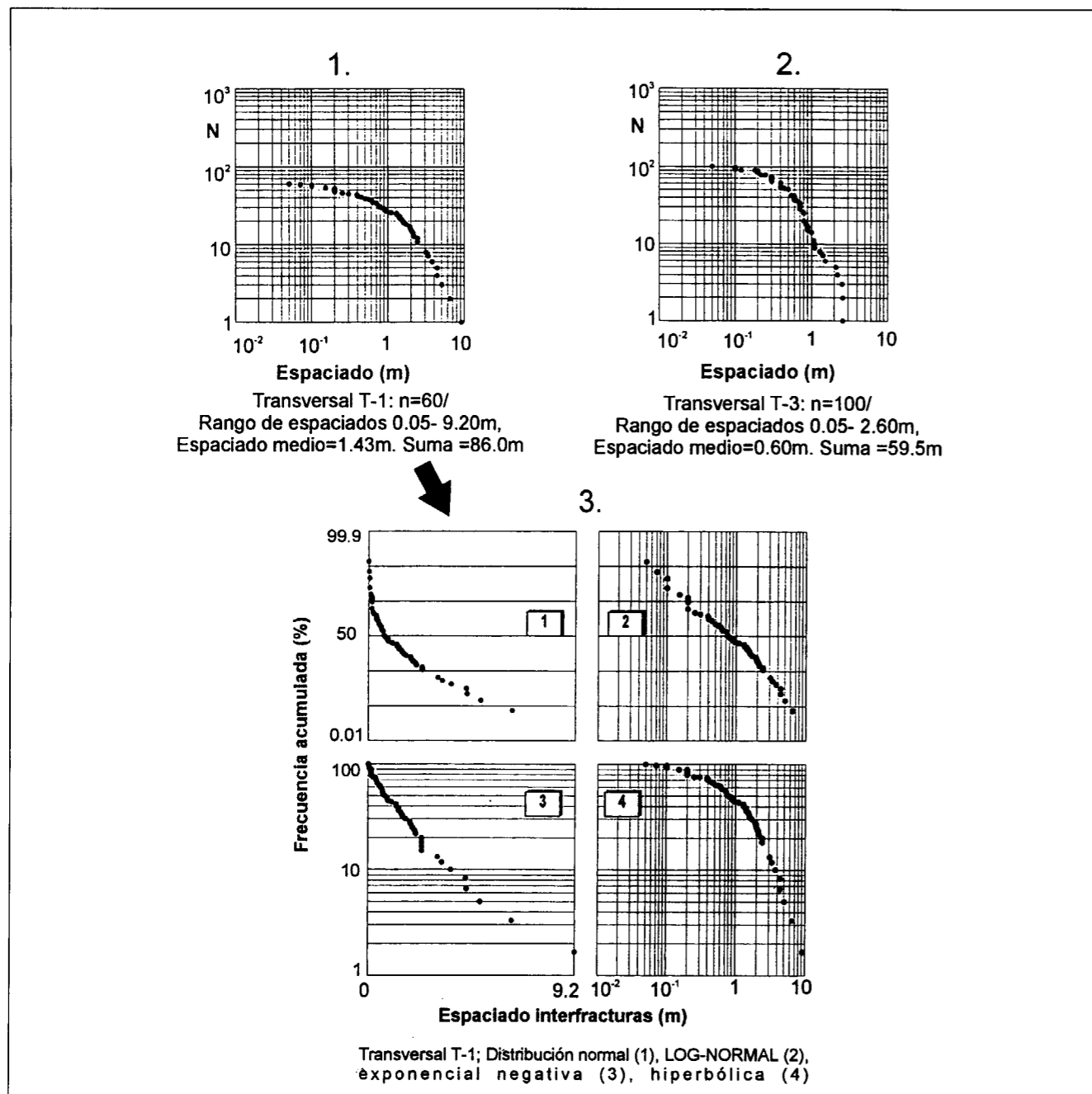


Figura 4: Diagramas de distribución de espaciados, (1) y (2), y Frecuencia acumulada(%) versus espaciado en la Transversal T-1 (3), Cadalso de los Vidrios, Madrid.

de espaciado de tipo fractal. Determinados grupos, con rangos de espaciado entre 0.2 y 1.5m, (límite mínimo de bloque explotable) presentan distribuciones de tipo lognormal o multifractal, lo que puede tener importantes implicaciones

desde el punto de vista de la extracción de rocas ornamentales. Por consiguiente, se pone de manifiesto que el conocimiento de la distribución de espaciados y su caracterización geométrica, puede suponer un importante criterio de discri-

minación desde el punto de vista de una racionalización de la extracción.

Como validación del método, éste se pretende aplicar a un número estadísticamente representativo de canteras de granitos en distintas áreas del Macizo Hespérico.

#### AGRADECIMIENTOS:

Queremos agradecer a la Empresa MARCELINO MARTINEZ S.L. las facilidades concedidas para la ejecución de este trabajo, y en especial a D. Juan Jesús Maestre Díaz, Ingeniero Técnico de Minas, por su total disponibilidad.

#### REFERENCIAS

CARREON-FREYRE, D. COJEAN, R. et ROCCHINI, J.F. (1996): Caractérisation géométrique des réseaux de fracturation en carrière de roches ornamentales. Application à l'optimisation de l'exploitation. Bull. De L'Association Internationales de Géologie de L'Ingénieur, Paris, n°54,45-58p.

DINIS DA GAMA, C. y BASTOS, M. (1994): Análisis volumétrico de macizos rocosos fracturados para optimizar la extracción de rocas y minerales. Ingeopress, 16, 2731 p.

GILLESPIE, P. A. HOWARD, C. B., WALSH, J. J. and WATTERSON, J. (1993): Measurement and characterisation of spatial distributions of fractures. Tectonophysics 226, 113-141p.

GUMIEL, P. y SANDERSON, D. J. (1994): Nota preliminar sobre la organización fractal de varios sistemas filonianos mineralizados en Au, W y Sn del Macizo Hespérico en Extremadura (España). Bol. Geol. Min., 105-3, 263-271.

GUMIEL, P.; SANDERSON, D. J.; ROBERTS, S., y CAMPOS, R. (1992): El uso del análisis fractal como discriminación de sistemas filonianos auríferos en el área de La Codosera, Extremadura (España). Geogaceta, 12, 3-7.

GUMIEL, P., CAMPOS, R., SANDERSON, D. J., y ROBERTS, S. (1995): Geometría y fractalidad de los sistemas filonianos de la mina de La Parrilla (Cáceres): Conectividad y Percolación. Bol. Geol. Min. 106-4, pp.16-37.

GUMIEL, P., CAMPOS, R., HERNÁNDEZ J. R., y PAREDES, C. (1996): Características de la geometría fractal de varios sistemas filonianos mineralizados del Macizo Hespérico. Su aplicación a la prospección. Parte I: mineralizaciones de Oro, Parte II: mineralizaciones de W, Sn, U y P. Geogaceta 20 (6), pp 1397-1404.

GUTENBERG, B. y RITCHER, C. F. (1954): Seismicity of the Earth and associated phenomenon. 2ª Ed. Princeton University Press.

HUANG, Q. y ANGELIER, J. (1989). Fracture spacing and its relation to bed thickness. Geol. Mag.126, 355-362.

ITGE (1990).- Granitos de España. ITGE. Madrid, España.

KAKIMI, T. (1980): Magnitude-frequency relation for displacement of minor faults and its significance in crustal deformation. Geol.Soc.Japan.Bull. 31, 467-487.

LA POINTE, P. R. y HUDSON, J. A. (1985): Characterisation and interpretation of rock mass joint patterns. Spec. Pap.Geol.Soc.Am.,199, 1-37pp.

NARR, W. y SUPPE, J. (1991). Joint spacing in sedimentary rocks. J.Struct.Geol.13,1037-1048.

PICKERING, G.; BULL, J. M., y SANDERSON, D. J. (1995): Sampling power-law distributions. Tectonophysics, 248 1-20.

PRIEST, S.D. y HUDSON, J.A. (1976). Discontinuity spacing in rock. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci & Geomech. Abs.13,135-148.

PRIEST S. D. (1993): Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman Hall, London, 473 pp.

SAMMIS, C. G. y BIEGEL, R. L. (1989). Fractals, Fault-gauge, and friction. Pure Appl. Geophys. 131, 255-271.

SAMMIS, C. G; OSBORNE, R. H; ANDERSON, J. L; BANERDT, M y WHITE, P. (1986). Self-similar cataclasis in the formation of fault gauge. Pure Appl. Geophys. 123, 53-78.

SANDERSON, D. J.; ROBERTS, S., y GUMIEL, P. (1994): A Fractal Relationship between Vein Thickness and Gold Grade in Drill-Core from La Codosera, Spain. Econ. Geol. 89, 168-173.

SCHOLZ, C.W., y COWIE, P.A. (1990): Determination of total strain from faulting using slip measurements. Nature 346, 837-839.

SILVA, S. (1996): Geometría fractal de la Zona de Falla de Lorca-Alhama (Murcia, SE España). Geogaceta 20(6), pp 1385-1388.

TABOADA CASTRO, J, ROMERO ESCUDERO, J. A. y MENENDEZ DIAZ, A.. (1994): Parámetros estructurales de los yacimientos de rocas ornamentales. Ingeopress, 16, 20-26pp.

TURCOTTE, D. L. (1986). A fractal model for crustal deformation. Tectonophysics, 132, 261-269.

TURCOTTE, D. L. (1989). Fractals in geology and geophysics. Pure Appl. Geophys. 131, 171-196.

VILLAESCUSA, E. y BROWN, E.T. (1990). Characterizing joint spatial correlation using geostatistical methods. In: Rock Joints (Barton, N & Stephansson, O. eds.).Balkema, Rotterdam, 115-122.

WALSH, J.; WATTERSON, J., y YIELDING. G. (1991): The importance of small-scale faulting in regional extension. Nature 351, 391-393.

Original recibido: Abril 1998.

Original aceptado: Junio 1998.

## COMPOSICION DE LOS MORTEROS EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCION DE LA CATEDRAL DE JACA.

Por R. CASTELLO MONTORI (\*)

### R E S U M E N

Se estudian las composiciones mineralógicas y químicas de los distintos morteros de unión y enfoscados empleados en la construcción y en sucesivas reformas llevadas a cabo en la Catedral de Jaca, así como las eflorescencias salinas que corresponden a una restauración moderna. Dentro de los morteros se define la relación árido-ligante y se hace el estudio petrográfico y granulométrico de dichos áridos.

*Palabras clave:* Mortero, Cal, Monumento, Restauración, Patrimonio, Catedral, Jaca.

### A B S T R A C T

Mortars joints and plasters used during the construction and following reforms of the Jaca Cathedral are studied in order to give their mineralogical and chemical composition; the efflorescence salts due to a more recent restoration are also analysed. The binder to aggregate ratio of the mortars has been established and done the petrographical and granulometric study of these aggregates.

*Key words:* Mortars, Lime, Monument, Restoration, Architectural heritage, Cathedral, Jaca (Huesca).

### INTRODUCCION

El presente trabajo se centra en la caracterización mineralógica y química de los morteros empleados en la construcción de la Catedral de Jaca, haciendo especial hincapié en los morteros de unión de sillares y sillarejos de fachada. También se establece la comparación de los diversos morteros antiguos utilizados en las distintas reformas del monumento.

La Catedral de Jaca es conocida internacionalmente como una de las joyas del románico asociada al Camino de Santiago. Hay varias hipótesis sobre su cronología, aunque la conclusión es que se trata de una espléndida fábrica románica con dos reformas importantes, fechadas a lo largo de los siglos XVI y XVIII, pero que no desvirtúan su primitivo aspecto. Se edificó en dos

etapas constructivas que comprenden desde el año 1076 hasta el 1130 (BUESA CONDE 1987) por lo que se puede considerar como una de las primeras construcciones románicas de dicho Camino de Santiago (GOMEZ-MORENO 1934). Ubicada en el casco urbano es de planta basilical con crucero y tiene tres naves, siendo la central más elevada que las dos laterales.

Los morteros de unión utilizados en las diversas reformas acaecidas en el tiempo son todos de cal. Se han desmuestado en diversos puntos del monumento, clasificándolos en seis grandes grupos. Cada muestra de mortero representa una amplia zona desmustrada, bien sea del llagado entre sillares, bien del relleno de mampostería diferenciando y definiendo las distintas edades de las muestras en función de su puesta en obra; también se ha hecho lo mismo con los enfoscados (cuatro grupos) y las eflorescencias (un grupo).

(\*) Dpto. de Geoquímica y Mineralogía del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC.

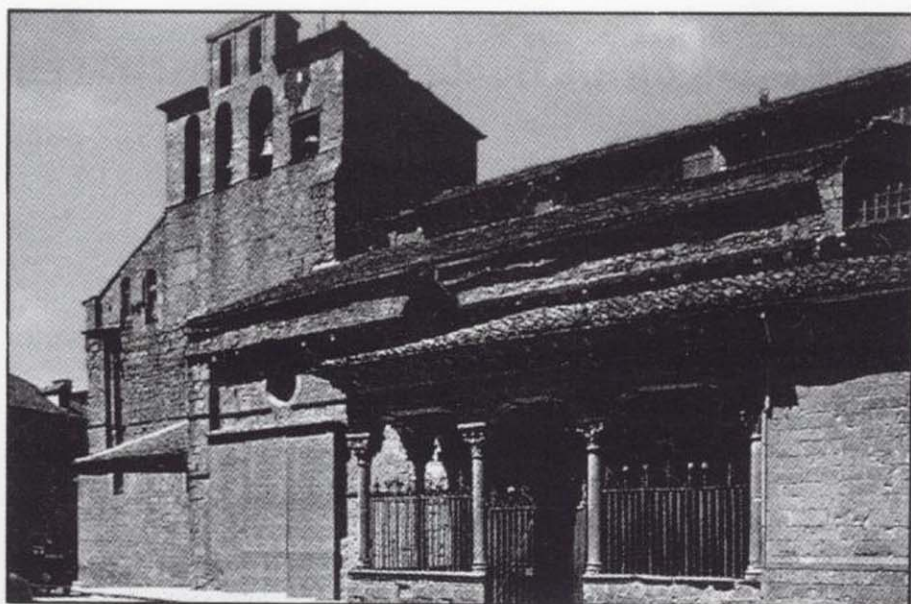


Figura 1. Fachada meridional de la Catedral.

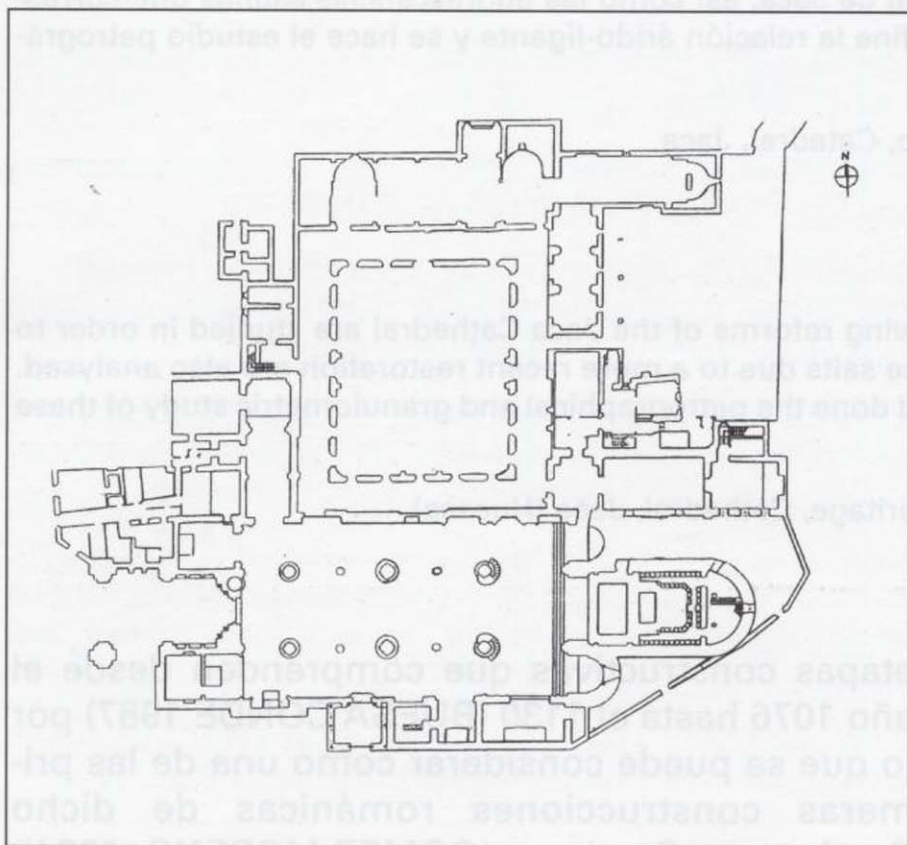


Figura 2. Plano de la planta del monumento y anexos.

La descripción y situación de estas muestras en la Catedral es la siguiente:

JA-MO-01: Mortero del ábside del lado del Evangelio, unión entre sillar y sillar de piedra calarenita (recién destapado en la última restauración de 1994). Muestra del siglo XI.

JA-MO-02: Muestra de mortero a 2,20 m de altura con respecto a la anterior, es el relleno de mampostería (más grosero con piedras de distinta litología, desde cantos de río hasta sillares reciclados). Muestra del siglo XI.

JA-MO-03: Mortero por la parte exterior del ábside Mayor (central). Sirve de relleno de las juntas del sillarejo allí existente. Por su parte interior existen unos frescos de fray Manuel Bayeu (1790). Situado en el lado norte de este ábside.

JA-MO-04: Muestra de mortero situada a 12,5 m aproximadamente del suelo. Es la fachada sur-sureste, en donde la calle se estrecha hasta pasar sólo un coche. Siglo XVIII (MORALES y MARTIN, 1979).

JA-MO-05: Muestra de mortero tomada en la torre, justo debajo del campanario, en la estancia del piso inferior. Finales del siglo XVI principios del s. XVII.

JA-MO-06: Mortero del claustro, zona que está al aire libre. En el siglo XVII se reforma el claustro y esta muestra corresponde a dicha reforma con sillares reutilizados de épocas anteriores (AZNAREZ, 1977).

JA-EN-01: Enfoscado, revoco de la parte cubierta del claustro, escasa cantidad de muestra.

JA-EN-02: Enfoscado cara sudeste de la catedral. A 12-13 m de altura con respecto al suelo (es la máxima altura de pared).

JA-EN-03: Enfoscado. Idem al anterior pero a 5,5 m de altitud.

JA-EN-04: Enfoscado. Idem anterior pero a 1 m del suelo.

JA-EF-01: Muestra de eflorescencias tomada en la torre del campanario, justo en la sala de debajo de la fachada oeste, provocadas en la última o penúltima reforma (1974 o quizá 1981). Es el único punto de la catedral en que se da este impacto visual por manchas blanquecinas.

## TECNICAS Y METODOS

Las técnicas de laboratorio que se han empleado en las distintas determinaciones son las siguientes:

*Difracción de rayos X:* La identificación mineralógica se hizo utilizando un difractómetro Philips

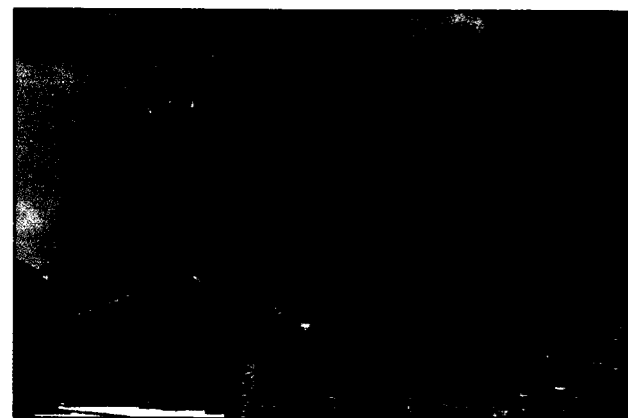


Figura 1. Fachada meridional de la Catedral.

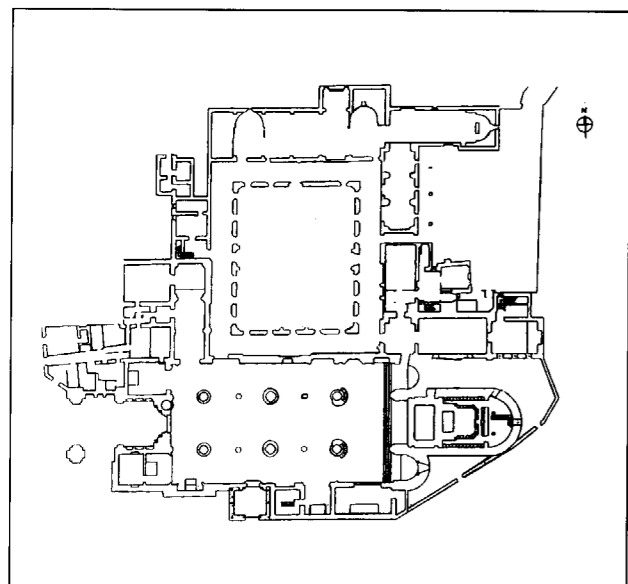


Figura 2. Plano de la planta del monumento y anexos.

La descripción y situación de estas muestras en la Catedral es la siguiente:

**JA-MO-01:** Mortero del ábside del lado del Evangelio, unión entre sillar y sillar de piedra calcarenita (recién destapado en la última restauración de 1994). Muestra del siglo XI.

**JA-MO-02:** Muestra de mortero a 2,20 m de altura con respecto a la anterior, es el relleno de mampostería (más grosero con piedras de distinta litología, desde cantos de río hasta sillares reciclados). Muestra del siglo XI.

**JA-MO-03:** Mortero por la parte exterior del ábside Mayor (central). Sirve de relleno de las juntas del sillarejo allí existente. Por su parte interior existen unos frescos de fray Manuel Bayeu (1790). Situado en el lado norte de este ábside.

**JA-MO-04:** Muestra de mortero situada a 12,5 m aproximadamente del suelo. Es la fachada sur-sureste, en donde la calle se estrecha hasta pasar sólo un coche. Siglo XVIII (MORALES y MARTIN, 1979).

**JA-MO-05:** Muestra de mortero tomada en la torre, justo debajo del campanario, en la estancia del piso inferior. Finales del siglo XVI principios del s. XVII.

**JA-MO-06:** Mortero del claustro, zona que está al aire libre. En el siglo XVII se reforma el claustro y esta muestra corresponde a dicha reforma con sillares reutilizados de épocas anteriores (AZNAREZ, 1977).

**JA-EN-01:** Enfoscado, revoco de la parte cubierta del claustro, escasa cantidad de muestra.

**JA-EN-02:** Enfoscado cara sudeste de la catedral. A 12-13 m de altura con respecto al suelo (es la máxima altura de pared).

**JA-EN-03:** Enfoscado. Idem al anterior pero a 5,5 m de altitud.

**JA-EN-04:** Enfoscado. Idem anterior pero a 1 m del suelo.

**JA-EF-01:** Muestra de eflorescencias tomada en la torre del campanario, justo en la sala de debajo de la fachada oeste, provocadas en la última o penúltima reforma (1974 o quizá 1981). Es el único punto de la catedral en que se da este impacto visual por manchas blanquecinas.

#### TECNICAS Y METODOS

Las técnicas de laboratorio que se han empleado en las distintas determinaciones son las siguientes:

**Difracción de rayos X:** La identificación mineralógica se hizo utilizando un difractómetro Philips

modelo X'Pert, con tubo cerámico de ánodo de Cu. Para el estudio de la fracción total de las diferentes muestras de mortero, enfoscado y eflorescencias salinas se utilizaron difractogramas de polvo desorientado. En el caso de la fracción arcilla ( $\leq 2 \mu\text{m}$ ) de las muestras de mortero se emplearon difractogramas de: a) polvo desorientado y los siguientes tipos de agregados orientados: b) seco al aire, c) solvatado con etilén glicol, d) calentado a 300 °C durante 3 horas, e) calentado a 500 °C durante 3 horas.

**Fluorescencia de rayos X:** En este trabajo se ha empleado un equipo secuencial Siemens SR300 con tubo de rodio de ventana final de 3 kw de potencia. Para los elementos mayoritarios y minoritarios, cuyos valores se expresan en % en forma de óxido, se ha usado la técnica de la perla de bórax. Los elementos traza, cuyos resultados se expresan en partes por millón (ppm) del elemento metálico, se han cuantificado a partir de la muestra molida a un tamaño de partícula menor de 2 micras.

Para la determinación de la materia orgánica en las muestras se ha empleado el método de pérdida por ignición estudiado por BALL (1964), GOLDIN (1987) y DAVIES (1974) y puesto a punto por LECHLER y DESILETS (1987). Aunque el método fue puesto a punto para suelos en esta investigación se ha aplicado a muestras de morteros ya que ofrece una alternativa rápida para la determinación rutinaria de materia orgánica y parece obtenerse valores representativos.

**Estudio petrográfico de los morteros:** Se han estudiado las láminas delgadas obtenidas por consolidación de los morteros con esteres de ácidos fumárico y maleico con glicoles. El trabajo ha consistido en la caracterización mineralógica (minerales  $> 4 \mu\text{m}$ ) de los componentes de la fracción detrítica (árido).

**Estudio granulométrico de los áridos de los morteros:** sólo se pudo tomar unos 100 gr. de cada muestra y se ha considerado la fracción menor de 0,08 mm como fracción única asociada al concepto de ligante (cal con impurezas). Posteriormente se llevó a cabo la caracterización mineralógica de cada fracción por medio de lupa binocular mediante conteo de granos.

#### RESULTADOS

En la tabla I se encuentran los resultados de la composición mineralógica semi-cuantitativa de diferentes fracciones de los morteros obtenida por difracción de rayos X que indican la similitud de la mineralogía de las fracciones total y arcilla. La calcita, identificada por los efectos a 0,303, 0,228 y 0,209 nm, es el componente mayoritario y aparece acompañada de una proporción media de cuarzo (picos a 0,334, 0,426 y 0,181 nm). Completan la composición una pequeña proporción de feldespato calcosódico (pico a 0,319 nm), illita (pico a 1,00 nm) y caolinita (pico a 0,710 nm). En algunas de las muestras se ha identificado la presencia de indicios de clorita (pico a 1,40 nm) y una pequeña proporción de dolomita (pico a 0,289 nm).

TABLA I (% en peso relativo entre muestras)

Muestra	Fracción	Q	F	C	D	L	I	K	Cl
Mortero 1	Total	28	3	63	-	6	5	1	-
	Arcilla	22	4	63	-	11	11	-	-
Mortero 2	Total	17	2	75	-	6	5	1	-
	Arcilla	4	-	80	-	16	11	5	-
Mortero 3	Total	17	1	71	2	9	9	tr	-
	Arcilla	16	2	74	tr	8	5	3	-
Mortero 4	Total	22	6	62	1	9	6	2	1
	Arcilla	23	4	60	2	11	8	3	-
Mortero 5	Total	10	1	80	-	9	6	3	-
	Arcilla	9	3	81	-	7	4	3	-
Mortero 6	Total	18	5	63	2	12	8	3	1
	Arcilla	17	3	68	1	11	9	2	-

Q=Cuarzo, F=Feldspatos, C=Calcita, D=Dolomita, L=Filosilicatos, I=Illita, K=Caolinita, Cl=Clorita, tr=indicios

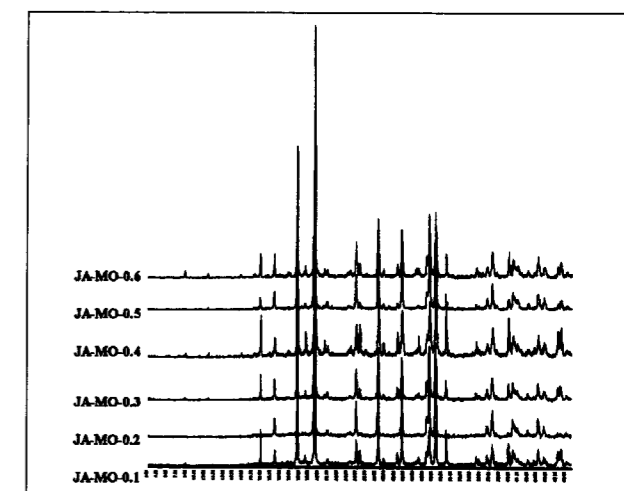


Figura 3. Difractogramas de polvo desorientado de la fracción total de los diferentes morteros.

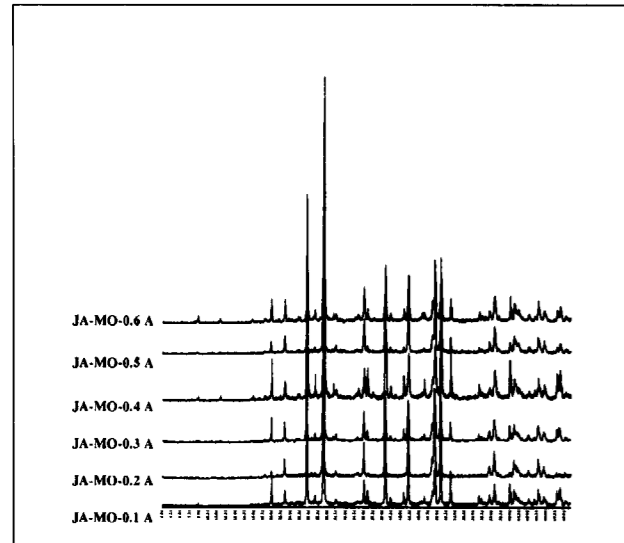


Figura 4. Difractogramas de polvo desorientado de la fracción arcilla de los diferentes morteros.

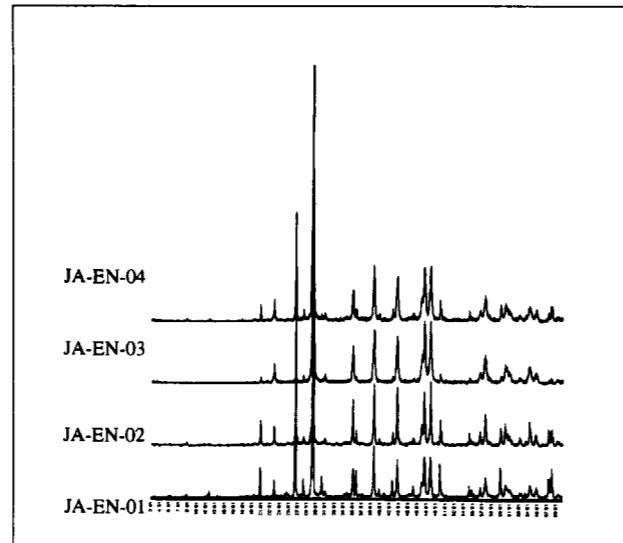


Figura 5. Difractogramas de polvo desorientado de la fracción arcilla de los diferentes enfoscados.

En la tabla anterior (tabla I) se ve la fracción arcilla y la fracción total y se constata que hay una similitud importante. Quizá exista una pequeña diferencia únicamente en el mortero 2, pero de todas maneras hay entre un 75 y un 80% de calcita, es decir es muy parecida. La dolomita, si aparece, lo es en las dos fracciones, nunca en una sí y en otra no.

Igualmente se han tomado y analizado cuatro muestras de enfoscados. En la tabla II se encuentra la composición mineralógica semi-cuantitativa de la fracción total de las diferentes muestras de enfoscado obtenida por difracción de rayos X. La mineralogía es muy parecida a la encontrada en el caso de las muestras de mortero, aunque la proporción de filosilicatos es ligeramente menor. Resalta del conjunto el enfoscado 3 compuesto casi exclusivamente de calcita.

TABLA II (% en peso relativo entre muestras)

Muestra	Q	F	C	D	L	I	K	Cl
Enfoscado 1	19	3	67	4	7	3	2	2
Enfoscado 2	18	2	75	tr	5	4	1	-
Enfoscado 3	5	1	93	-	1	tr	tr	-
Enfoscado 4	12	2	81	1	4	3	1	-

Q= Cuarzo, F=Feldespatos, C=Calcita, D=Dolomita, L=Filosilicatos, I=Illita, K=Caolinita, Cl=Clorita, tr=indicios

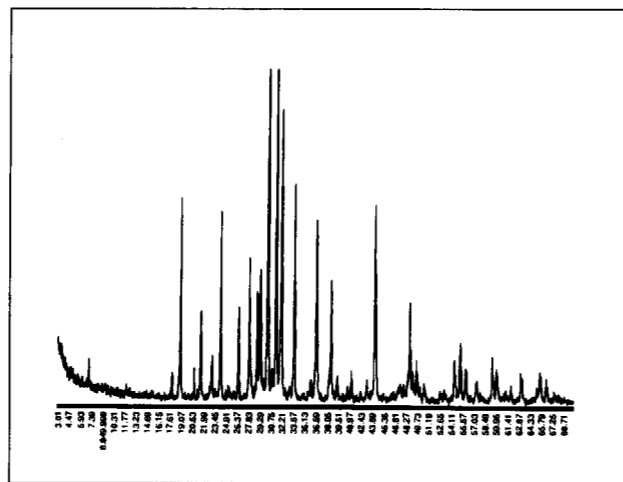


Figura 6. Difractogramas de polvo desorientado de las eflorescencias salinas (JA-EF-01).

cuarzo). Es decir hay sulfatos, cloruros y carbonatos, en la misma muestra y todos fundamentalmente de Na. No hay sulfatos de Ca ni de Mg, ni los hidratados.

Los resultados del análisis químico de los elementos mayoritarios y minoritarios expresados en % vienen reflejados en el cuadro siguiente (Fluorescencia de Rayos X) (tabla III):

TABLA III

N.º M.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Suma	P.P.C.	Total
MO-1	38,1	5,2	2,7	0,07	1,05	23,7	0,9	0,92	0,32	0,47	73,4	24,1	97,5
MO-2	30,8	4,1	2,5	0,06	0,97	32,1	0,8	0,77	0,27	0,22	72,4	28,8	101,2
MO-3	26,8	4,2	2,4	0,06	0,97	32,1	0,7	0,79	0,27	0,21	67,7	29,5	97,2
MO-4	35,5	5,8	2,9	0,06	1,33	26,6	1,16	1,16	0,41	0,21	74,9	25,9	100,8
MO-5	21,4	3,2	2,1	0,05	1,22	36,1	1,25	1,06	0,27	0,17	66,9	32,6	99,5
MO-6	29,1	6,5	2,9	0,06	1,26	29,7	1,18	1,35	0,38	0,21	72,4	28,5	100,9
EF-1	7,8	1,5	1,04	0,03	-	15,3	10,1	22	0,09	0,09	68,2	9,7	-

Todos los valores dados en la tabla anterior están dentro de las curvas de calibrado utilizadas salvo el dato de la muestra EF-1 de K<sub>2</sub>O (22%) en la que el calibrado ha sido entre 0,001% como valor mínimo y 15% valor máximo, por lo que el valor real puede no ser exactamente 22%. Para los elementos traza, analizados igualmente por fluorescencia de rayos X, se han obtenido los contenidos expresados en el cuadro siguiente (tabla IV):

TABLA IV

Muestra	V (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Pb (ppm)	Zr (ppm)	Ba (ppm)
JA-MO-01	66	128	-	36	71	59	891	61	245	173
JA-MO-02	69	147	-	47	74	56	988	70	251	101
JA-MO-03	76	147	-	41	66	63	1660	58	246	103
JA-MO-04	90	141	-	40	74	78	899	60	299	126
JA-MO-05	64	142	-	72	66	54	2133	64	186	61
JA-MO-06	96	158	-	40	123	90	2313	54	264	172
JA-EF-01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Los resultados de la pérdida por calcinación y la cantidad de materia orgánica vienen expresados en el cuadro siguiente (tabla V).

TABLA V

N.º de muestra (<0,08 mm)	Peso en gr (105 °C)	Peso en gr (400 °C, 8 h)	% de M.O.	Peso en gr (1050 °C, 2 h)	% P.P.C. 400+1050°C
JA-MO-01	0,9424	0,913	3,12%	0,7157	20,94%
JA-MO-02	0,8722	0,8441	3,22%	0,6209	25,59%
JA-MO-03	1,0000	0,9657	3,43%	0,7042	26,15%
JA-MO-04	1,0054	0,9707	3,45%	0,7448	22,47%
JA-MO-05	1,0000	0,9445	5,55%	0,6835	26,10%
JA-MO-06	0,9619	0,9387	3,72%	0,6996	24,86%

En el estudio petrográfico de los morteros se ha hecho el conteo de granos de distinta naturaleza de las seis muestras de mortero de unión habiéndose contabilizado un total de 5.689 puntos.

Los resultados obtenidos en este estudio petrográfico vienen reflejados en la tabla VI, en la que se dan los porcentajes de los componentes de la fracción detrítica por orden de importancia: fragmentos de roca (rocas carbonatadas, minerales arcillosos y areniscas), cuarzo y chert, feldespatos (feldespato K y plagioclasa), micas y otros no identificados entre los cuales se incorporarían opacos, etc. y un grupo denominado "negro-parduzcos" que comprende restos de madera y otros componentes carbonizados.

TABLA VI

n.º muestr.	F.R.			Otros componentes				
	CO <sub>2</sub> %	M. Arc.	Arenisca	Q	Fdptos.	M. Negr.	Micas	No iden.
JA-MO-01	38,10	4,48	12,88	28,85	-	14,00	-	1,68
JA-MO-02	39,38	-	-	36,35	3,77	17,6	0,95	5,70
JA-MO-03	32,22	3,40	1,00	46,28	0,66	14,74	-	1,70
JA-MO-04	39,72	4,38	0,27	36,99	-	15,61	0,82	2,19
JA-MO-05	37,56	4,69	4,46	24,18	-	19,95	3,75	5,40
JA-MO-06	63,40	1,45	-	33,00	1,94	10,19	-	-

F.R.=fragmento de roca, M. Arc.=Minerales arcillosos, Q= Cuarzo, Fdptos=Feldespatos, M. Negr.=Minerales negro-parduzcos, No iden=Minerales no identificados

Las granulometrías de los morteros empleados en la catedral de Jaca oscilan entre arena gruesa a fina, con escasa dispersión de diámetros de clastos, hacia arena muy fina por un lado y grava fina por el otro.

Al estudiar las curvas (distribución granulométrica y curvas acumuladas de la fracción detrítica >0,08 mm de las muestras de morteros) se pueden hacer las siguientes observaciones. Las muestras JA-MO-01 y JA-MO-05, tanto en la distribución de fracciones como en la curva acumulada, presentan una traza de gran parecido (bimodal). Tienen un máximo ancho que corresponde a dos intervalos granulométricos (0,2-0,4 mm y 0,4-1 mm) ligeramente desplazado en la JA-MO-01 (menos selección) hacia los 0,4-1 mm. El estilo de las curvas de distribución de tamaños de las muestras JA-MO-03 y JA-MO-06 tienen bastantes semejanzas (unimodales), su tamaño de clasto más abundante está en el intervalo 0,2-0,4 mm aunque la JA-MO-06 presenta una proporción de fracción fina menor. La muestra JA-MO-02 puede tener una repartición similar

aunque más atenuada y heterométrica, conservando ese máximo en los tamices 0,2-0,4 mm pero mucho menos remarcado. La muestra JA-MO-04 (unimodal) es la que tiene el árido de menor tamaño ya que el 53 % corresponde a una fracción <0,2 mm.

En el cuadro siguiente (tabla VII) viene reflejada la relación árido a ligante de los morteros estudiados así como la fracción detrítica más representativa por ser la más abundante.

TABLA VII

N.º muestra	JA-MO-01	JA-MO-02	JA-MO-03	JA-MO-04	JA-MO-05	JA-MO-06
árido	5	4	3,5	4,9	3,7	4,6
ligante	1	1	1	2	1	1
fracción dominante	arena gruesa	arena media-fina	arena media	arena fina	arena media-gruesa	arena media

En este trabajo se ha considerado como fracción ligante los constituyentes con un tamaño de grano inferior a 0,08 mm.

En el estudio con lupa binocular se ha encontrado una gran similitud en la composición del árido y las únicas diferencias apreciables corresponden al tamaño de grano o a la selección granulométrica que ha sufrido la muestra. Aunque no sea más que repetir los datos presentados en la tabla anterior se puede apuntar que las muestras JA-MO-02 y la 04 tienen la fracción detrítica de tamaño de grano más fina que el resto de los morteros. Se debe destacar la presencia en la fracción >2 mm de clastos de forma puntual con dimensiones que alcanzan como máximo los 20-22 mm, siendo los más corrientes y abundantes de 2 a 6 mm.

La composición de los granos identificados en el estudio con lupa binocular de las distintas fracciones separadas son los siguientes (tabla VIII):

TABLA VIII

N.º muestra	JA-MO-01	JA-MO-02	JA-MO-03	JA-MO-04	JA-MO-05	JA-MO-06
Naturaleza de los clastos	Arenisca-limo de colores claros, cuarzo, cuarcita, arenisca roja y limolita, restos carbonosos: carbón de madera, algún fragmento de granito esquisto o micacita	Árido muy similar a la muestra anterior. Cuarzo escaso, restos de material carbonoso, arenisca roja.	Idéntica a JA-MO-02	Similar a las anteriores. Carbón vegetal, fósiles, micacitas, restos de madera	Caliza, arenisca roja, fósiles, carbón.	Misma litología que las anteriores

La composición litológica de los áridos de los morteros tiene como característica común su gran heterogeneidad. Hay clastos de calizas, areniscas de diferentes tipos (alguna del Permotriás), fragmentos de rocas ígneas, limolitas, rocas metamórficas (cuarcitas, micacitas, esquistos), etc. Es curioso el dato de encontrar trozos de carbón vegetal en todos ellos. En cuanto a su repartición por fracciones de tamaños es totalmente irregular y no existe cadencia de ningún tipo ni presencia preferente de alguna litología en determinado tamaño concreto. Por esto se da la composición global y de manera cualitativa.

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

La composición mineralógica de los morteros presentan escasas diferencias entre ellos, de manera que los constituyentes tanto en el ligante como en el árido empleado se repiten. Solamente existen pequeñas variaciones en el porcentaje y en la presencia de algún elemento traza que aparece en alguna muestra determinada.

Comparando los resultados de las distintas técnicas analíticas se observa que en la muestra JA-MO-01 existe más cantidad de cuarzo que en los otros morteros (28%) según la Difracción de rayos X y confirmado por Fluorescencia de rayos X. Al estudiar la lámina delgada (L.D.) correspondiente a esta muestra se ve que en el conjunto de fragmentos de roca, aunque domina como en todas las láminas la presencia de trozos de material carbonatado, hay más clastos de arenisca. De forma indirecta se confirman los resultados de mayor presencia de cuarzo o minerales silíceos. La JA-MO-02 no se sale de la composición del conjunto más que por tener un contenido un poco mayor de feldspatos. La JA-MO-03 por presentar algo más de ligante en relación con la proporción del árido y más cuarzo entre los fragmentos de roca. La JA-MO-04 tiene los valores más altos en contenido de Zr y de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con respecto al grupo. La JA-MO-05 quizá sea la muestra que se separa un poco más del conjunto de los seis morteros pero dentro de una composición muy parecida. Tiene más cantidad de Sr, CaO (36,1 %) y de materia orgánica (5,55 %) justificada por la presencia abundante de restos de

materia carbonosa identificada en lámina delgada (Microscopio polarizante de luz transmitida) y con la lupa binocular. La presencia de esta materia orgánica y el contenido alto en CaCO<sub>3</sub> justifica las mayores pérdidas en peso por calcinación (PPC). Finalmente la JA-MO-06 se caracteriza por sus valores ligeramente más altos en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O y elementos traza como el Rb (90 ppm) y Sr (2313 ppm).

Evidentemente lo que define mineralógicamente a estos morteros es el tener un ligante de cal muy pura, la ausencia de sulfatos y cloruros, la presencia de restos carbonosos, la ausencia o bajo contenido de minerales de la arcilla y el predominio en el árido de clastos de material carbonatado. Igualmente es un dato que caracteriza al mortero el que la relación árido/ligante esté entre 3,5 y 5. Por otra parte en las determinaciones analíticas no se detecta ningún aditivo especial lo que ocurre es que está muy bien trabajado y mezclado y con una puesta en obra cuidadosa.

Los áridos de estos morteros por su composición corresponden a sedimentos típicos de la zona, es decir sabiendo que aguas arriba afloran materiales permotriásicos, rocas graníticas, paquetes carbonatados, etc. Son áridos de una composición mineralógica muy heterogénea como corresponde a sedimentos de un río en zona alta de su curso y por tanto de carácter fluvio-torrencial.

En la confección del mortero no hubo en el árido una selección de tamaños de grano importante, simplemente se tamizó por debajo de una malla y se mezcló directamente con la cal, sin ningún tratamiento previo que permitiera separar las fracciones más finas del árido.

Concluyendo se puede decir que los morteros de unión al tener una composición con un ligante de

cal muy pura, un árido de granulometría fina a fina-media, ausencia total de sales y casi de arcillas, con una relación ligante/árido buena y con una composición del árido mayoritariamente carbonatada dan origen a un sistema poroso con un comportamiento favorable y por tanto son el auténtico soporte de los paramentos de la Catedral de Jaca.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a la Dra. M. T. García González por su ayuda en la D.R.X. y a D. Fernando Pinto por su colaboración.

## REFERENCIAS

- AZNAREZ, F. (1977). Aragón. Colección "Tierras de España" de la fundación Juan March. pp. 158-160. Madrid.
- BALL, D. F. (1964). Loss-on-ignition as an estimate of organic matter carbon in non calcareous soils. J. Soil Sci. 15, pp. 84-92.
- BUESA CONDE, D. (1987). Las catedrales de Aragón. Zaragoza.
- CASTELLO MONTORI, R. (1997). Tesis Doctoral. Univ. Politécnica, Madrid, 293 pp.
- DAVIES, B. A. (1974). Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38, pp. 150-151.
- GOLDIN, A. (1987). Reassessing the use of loss-on-ignition for estimation organic matter in non calcareous soils. Commun. Soil. Sci. Plant. Anal. 18, pp. 1111-1116.
- GOMEZ-MORENO, M. (1934). El arte románico español. Madrid.
- LECHLER, P. J. and DESILETS, M. O. (1987). A review of the use of loss-on-ignition as a measurement of total volatiles in whole-rock analysis. Chemical Geology, 63. Elsevier Science Publ., pp. 341-344.
- MORALES y MARTIN, L. (1979). Los Bayeu. pp. 163-186. Zaragoza.

Original recibido: Abril 1998.  
Original aceptado: Mayo 1998.



# INFORMACION

## SINTESIS MINERA Y CALZADAS ROMANAS DE BELMEZ-VILLAVICIOSA.

Por A. DAZA SANCHEZ (\*)

Esta comarca minera presenta una gran diversidad de asentamientos; no se trata de manifestaciones de un solo periodo, sino que hay continuidad, como refirió D. Antonio Carbonell Trillo-Figueroa (1923; en el número 3 del Boletín de la Real Academia de Córdoba).

Es tierra de contrastes, sensaciones e históricamente por conocer. El Valle del Guadiato es un territorio llamado también Sierra de los Santos, y se dispone NO-SE entre el batolito de los Pedroches y el sinclinal de Sierra Albarrana-Bembézar. Es una comarca de paisaje pintoresco, con los relieves abruptos de la Sierra de los Santos y el fondo de valle del río Guadiato.

### METALOGENESIS.

Tiene suelos silíceos arcilloarenosos sobre pizarras o granitos. El río Guadiato es remontante hacia el Guadiana; presenta un retraso erosivo que conservó las capas de carbón. En este territorio el macizo rocoso del NE tiene vergencia NE y el del SO la tiene SO (como si de una flor al abrirse se tratara a partir del anticlinal de la Sierra de los Santos); existe magmatismo plutónico y volcánico, sin-sedimentario del Carbonífero y metalogénico del ciclo hercínico.

Fue una cuenca geosinclinal en la que se

(\*) Académico Correspondiente de la Real Academia de Córdoba. Profesor de Prospección de la Universidad de Córdoba

depositó primero la serie detrítica Precámbrica, con esquistosidad metamórfica y plegada tipo *Kink-Bands*; posteriormente basculó y emergió la zona N, para bascular nuevamente a finales del Cámbrico en sentido opuesto (emergiendo del mar la zona S y apareciendo subsidencia en el N), depositándose el Devónico cuarcítico, con esquistosidad de plano axial, en la zona N y, más tarde, las pizarras del Culm (carbonífero marino) con esquistosidad de fractura y etapas ígneas del eje magmático Cerro Muriano-Villaviciosa-Belmez. Finalmente, se produce la emersión total y la sedimentación del Carbonífero hullero, que es plegado y fallado por el último pulso hercínico. Existen yacimientos filonianos hidrotermales de barita (con dirección NE) en Villaviciosa y Belmez, en el vulcanismo ácido y pizarras; también se encuentra antimonio en Espiel. En el plutonismo básico y pizarras hallamos cobre en Belmez y Cerro Muriano; fluorita en Cardenchoza y Cerro Muriano; oro en Belmez, Villanueva del Rey y Cerro Muriano; plomo, plata y zinc en Villaviciosa, Belmez y Fuente Obejuna en los contactos, así como yacimientos de caolín-alúmina en las pizarras devónicas de Belmez, carbón en Belmez, mercurio en Obejo. Carbonell cita el yacimiento de titanio y magnetita en Villaviciosa.

Existen yacimientos estratiformes vulcano-sedimentarios de sulfuros polimetálicos y de óxido de hierro singenético en Rosalejo-Paredón de Belmez y Berrazas de Villanueva del Rey, además de los indicios de yacimientos pegmatíticos de Villaviciosa y Doña Rama-El Entredicho.

### VESTIGIOS MINEROMETALURGICOS.

Los yacimientos mineros de Belmez-Villaviciosa o Sierra de los Santos han sufrido una explotación continua, en rafas y rampas, desde el Calcolítico, (numerosos martillos mineros de piedra, destaca Antonio Carbonell los de Villaviciosa en Alcornocosas y Milaneras); los tartesios ya conocían la técnica del bateo —mezclando el mineral con agua y sedimentándolo—, y refundían los metales para refinarlos. Explotaban minas de cobre y oro al Sur de Belmez, en las Minas de “La Gata” y “La Pastora”. Del oligisto silíceo de la Sierra de los Santos obtenían hierro (en Belmez hay una veintena de minas de hierro: Cerro Quemado, Víboras, Doña Rama, El Hoyo, Cortijo Viejo, Cuadrado, La Parrilla-Joaquina, Corcho, Huertas, etc), después de reducirlo con carbón y fundente de cal viva para formar escoria de silicato cálcico. De la roca caliza de Sierra Palacios y del Castillo de Belmez, obtenían por calcinación cal viva, que apagaban con agua para conseguir el hidróxido cálcico, necesario en la argamasa y cal-canto. Los carbonatos metálicos se trataban igual pero luego se reducían con carbón.

Por encima de los yacimientos de sulfuros aparece una montera de óxidos de cobre aflorantes con buena ley de oro —que lavaban—. Más tarde se inicia la explotación del plomo-plata y se domina la metalurgia de copelación (en la fundición de la Pava hemos recogido escorias y ladrillos pequeños del horno), el aire oxida el plomo —litargirio— y queda arriba la plata. También se conoce la metalurgia de reducción de

óxidos metálicos, como la fundición de cobre de Sierra de Gata, en hornos de carbón y aire —han aparecido restos de escorias y ladrillos de varios hornos de malaquita-calcosina; en el poblado cercano se han hallado balas de honda y lingotes de 32 kg de Pb-Ag—. Existe así mismo metalurgia de oxidación de sulfuros metálicos, que con aire en el horno, dan sulfatos.

Nuestros antepasados romanos dominan el endurecimiento del cobre, buscando además una fácil fusión; con la mezcla con casiterita formaban bronce, o bien con zinc conseguían latones, similares al oro. Los romanos pensaban que el estaño era plomo aleado con plata, *Stagnum stannum*. Conocían la amalgamación o disolución del oro y plata con el mercurio, que luego destilaban, según Plinio. Los romanos explotaron la lutita Namuriense de Belmez para cerámica, ladrillos y tejas; las alfarerías se encuentran entre el Guadiato y la Estación de Belmez. Esta lutita tiene

$\text{SiO}_2=57\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3=18\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3=10\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}=5\%$ ,  $\text{MgO}=2\%$ , y  $\text{CaO}=\text{Na}_2\text{O}=\text{TiO}_2=1\%$ .

Al profundizar las minas aparecen los sulfuros de cobre, que deben tostarse, para eliminar azufre (pasan a óxidos), y luego calentarse con carbón y fundente (cal-reducción); posteriormente se sopla y se oxidan los metales, pasando el hierro y el zinc a la escoria, para continuar soplando hasta que el sulfuro cuproso pasa a óxido. Estrabón, de la época de Augusto, cita oro, plata, hierro y cobre nativos, y menciona que los habitantes de esta Sierra de los Santos se calentaban con piedras encendidas: ésta es la primera referencia del carbón fósil (las capas de Cabeza de Vaca y Aurora afloran en Belmez).

Es de interés citar la apreciación de Plinio "Palmati Lapidis Circa Munda", piedras que llevan impresa la huella de una palmera junto (*circa*: alrededor, por todas partes) al terreno de la batalla por el dominio del mundo —en la que César

venció a los hijos de Pompeyo— (posiblemente La Ballesta). Son plantas fósiles en las rocas (según refiere el geólogo Freyberg); por ello consideramos a Plinio el precursor de la Paleobotánica de la Cuenca Carbonífera de Belmez, única en la Bética.

El Itinerario de Antonino (s. III) cita la ruta de Córdoba a Mérida, de 144 millas; Córdoba a El Vacar son 20 millas y posteriormente esta gran calzada va a Mellaria (56 millas de Córdoba) y a Metellinum. Se han encontrado varios miliarios, el más representativo de Constantino (310 d.C.) en el Cortijo de Dos Hermanas-Samaniego, 3 km al N de Villanueva del Rey, muy cercano al término de Belmez (Padilla 1989, en Corzo, 1992).

Según han obtenido miembros del Seminario Antonio Carbonell en Valverde, las dimensiones del carro minero romano eran de 1 m de ancho, 0,5 m de altura de eje y 1,5 m de longi-

tud de caja. Los romanos esencialmente buscan oro, plata y cobre con rafas en crestones, y profundizan más de 100 m con pozos de mina en rampas. En Villaviciosa explotaron plomo, zinc y plata en Mirabuenos-La Gran Mina (martillos y candiles), Los Almadenes-La Vegosa, Las Herrerías y Dehesa de El Nevado, Cabeza Redonda, Fuente Bernardo y Fuente Vieja (se han encontrado martillos y hachas de piedra en la Mina "La Sultana" en Los Cabriles) y cobre —con fundición— en el arroyo de La Campana-Catalán; en Belmez, cobre en La Pastora (monedas de oro ibéricas, martillos de piedra y punterolas encontrados por A. Carbonell), Doña Rama, Sierra de Gata, el Abubillos y el Rosalejo-Cerro Víboras (huecos subterráneos), oro en Sierra de Gata y Lomas del Paredón, plomo en el Cortijo Viejo, El Hoyo, Doña Rama y Los Mestos, calcopirita en el Nogal y Parrilla (oeste del Cerro Víboras, con sendas mineras sinuosas y huecos mineros), así como hierro en Samaniego, Rosalejo-Cerro Víboras y El Entredicho.

En Belmez hay restos de poblados Neolíticos en su Castillo y en Sierra Palacios, habiéndose reconocido en los cazaderos del Guadiato y Fresnedoso la existencia de numerosas lascas retocadas y bifaces, hueso trabajado y asentamientos megalíticos (doce dólmenes hasta el momento, en Fuente Corcho, Vega Fresno, Casas Don Pedro, Sierra Palacios, Doña Rama, Entredicho, Fresnedoso, Cortijo Viejo y Samaniego, ajuares con puntas de flecha de cobre), siempre cerca de minas metálicas. En el Museo Arqueológico Nacional están desde 1933 dos torques de oro con triángulos rellenos —Edad de Bronce II— del Bujadillo de Belmez; también han aparecido en el casco urbano monedas romanas del Imperio (de un particular una DNARCADI-VSPFVC en calle Pedroche, 29 —1980— y otras en el Arqueológico Cordobés), y el Cipo en mármol hallado en 1947 en calle Hoyancones, 12 con la inscripción de Quintus Valerius Severinus, que especifica que era MELLARIENSE y se encuentra en el Museo de Belmez, citado por Hübner (nº 2346, C.I.L.) en 1869, ya que originalmente se localizó en el castillo de Belmez.

Caserones antiguos cita Carbonell (1947) de Villaviciosa, en la Cañada de la Pastelera (frente al Castro y Picón), 1 km al Este de la Cueva del Agua, en Alcornocosas, Valdefuentes y también

en la Era del Aperador, Tomillarejo y Alcornocal. Por nuestra parte, en Villaviciosa encontramos villares iberos, algunos redondos, diez kilómetros al SO, entre el río Cabrilla y el cerro de las Piedras, también un poblado-castillo ibero-romano en el Névalo y otro en el Cerro Cabeza de Vaca con necrópolis, 1 km al NE, villas árabes en Valdesénico (3 km al este de Villaviciosa, entre los arroyos Nava Encina y Morales) y en el cortijo Carrizales (entre Peñas Pardas y la loma de la Calera), necrópolis árabes en Castaño-Era Grande y Reyertas-Posada Nueva. Así mismo, se encuentra un poblado ibero, con muros de piedra desnuda, en una hectárea en el Cerro de los Castillejos (Fuente Obejuna), cerca de la mina romana de La Loba; otros restos aparecen en la fundición de la Pava cercana al puente Molinos en el Guadiato.

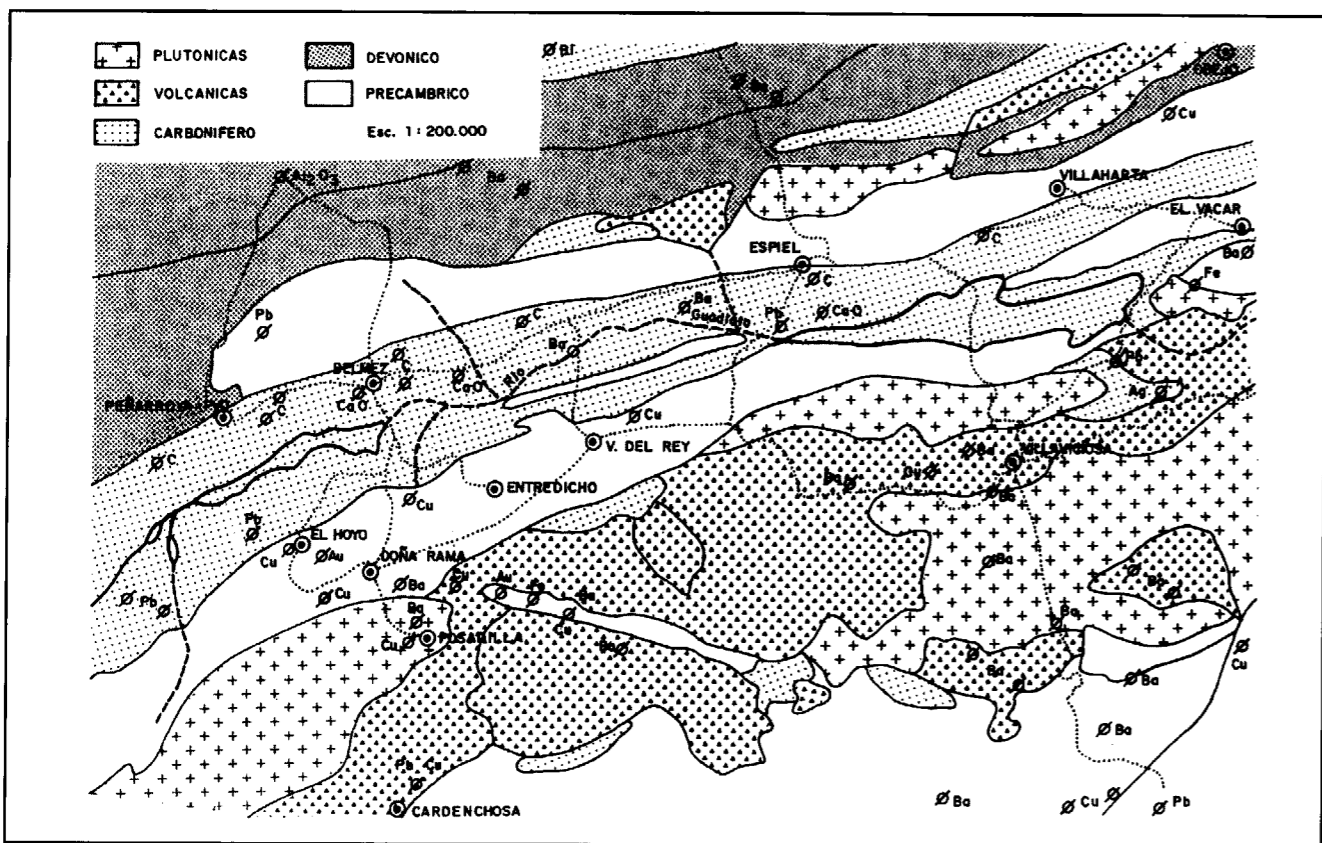
En Belmez hemos reconocido que existen ruinas de poblados romanos (con abundantes tégulas y cerámicas íberas y romanas) en la margen izquierda del Guadiato, Sur del cerro Apolinar, justo en el estribo Norte de la presa del pantano, otro en Sierra de Gata (abundantes restos levantados por el gasoducto), otro en Sierra Palacios, otro en el arroyo de las Huertas, otro más en la Toma del Molino y restos en la Vega del Fresno. Pero entre todos destacamos la ciudad romana existente en la población de Belmez y hasta más al Este de las Casas Baratas, donde la Corta de Carbón colindante con la calle La Mina, ha levantado ánforas, muros, tuberías de plomo, tégulas, baldosas de mármol y terra sigillata, que la Consejería de Cultura (JA) aconsejó volver a tapar, sin estudiar ahora por una gran escombrera de ENCASUR.

#### MELLARIA.

Ciudad de época Flavia, según Plinio *non ignobilia*, citada también por Tolomeo y Estrabón, se encuentra en la Beturia Trúrdula a 52 millas de Córdoba, 56 millas según el *Itinerario* de Antonino. El territorio mellariense es atravesado por dos calzadas mineras principales. La primera es la vía prehistórica (Antonio Carbonell, 1946), gran calzada militar y minera (*Itinerario* de Antonino e Idrisi) de más de 5 m de ancho que une Córdoba con Mérida por El Vacar, Belmez (miliario de Constantino) y Los Blázquez (Tolote), luego a Zalamea y Medellín, teniendo a su vez

varias vías secundarias, desde Espiel a Sisapo (por Los Pedroches), desde Belmez a Gahete, y también a Llerena. La otra calzada minera principal se extendía desde Belmez y Villaviciosa a Posadas, para conectar con la Vía Corduba-Hispalis por la margen derecha del río, y embarcar la producción en el puerto de Peñaflores.

El nombre de la ciudad de los turdetanos, Mellaria, tiene relación con la industria de la miel (Estrabón, 144 en Schulten, 1920) y la exportación de salazones de todo tipo era grande. La única villa existente justo en la ruta de la gran calzada, Córdoba-Mérida, es Belmez, que posee el castillo más estratégico, posee la única arcilla para cerámica en su margen del Guadiato, existe roca caliza para calcinar y numerosas minas de gran diversidad. Se han encontrado numerosos restos romanos en Belmez, en el casco urbano: monedas romanas en la calle Pedroche y tégulas en el castillo, en calle La Mina, calle Covadonga y Casas Baratas; en Casas Baratas han aparecido muros, ánforas y otros materiales al inicio de la explotación de la Mina de Carbón en 1995, que mostró restos de la ciudad romana, lamentablemente no estudiados. También citamos el miliario de Constantino recientemente descubierto en el cortijo de Dos Hermanas (Villanueva del Rey y colindante con Samaniego de Belmez), posiblemente en la milla 51 y Mellaria se encuentra en la milla 56, según Antonino —s. III—: ello corresponde al casco urbano de Belmez (entre las Casas Baratas y el Castillo de Belmez). Existen más datos: se ha encontrado en el Castillo de Belmez un cipo en mármol macael, de Quintus Valerius Severinus (1869; Hübner, C.I.L., 2346), en el que se expresa que era Mellariense (el castillo se encuentra 1 km al Noroeste del emplazamiento que estamos investigando de una zona de la ciudad de Mellaria); todo lo anterior sostiene la tesis de la existencia de la ciudad de Mellaria en parte del casco urbano de Belmez (el cerro de Masatrigo es sólo la villa de la familia Seproniana). La tégula romana de Mellaria presenta las siguientes características: es ligera, presenta fluidez de alta temperatura, con cuarzo abundante, alúmina, cal, no mancha, procede de la lutita Namuriense de alta plasticidad, aparece ortoclasa (feldespato potásico), caolín y algo de hierro de concreciones diagenéticas de siderosa. En la cerámica fina de Mellaria aparece también moscovita y en la cerá-



mica gris se observan además turmalina y magnetita; la terra sigillata se está estudiando.

El terreno de Belmez se presta a la amplificación sísmica con efectos dañinos sobre viviendas bajas, ya que la frecuencia de vibración media es de 10 hz en el casco urbano, siendo en Cabeza de Vaca la media de 15 hz (Daza, 1993); ello ha debido ser quizá la causa del ocaso y destrucción de la ciudad romana, debido a los efectos multiplicadores a que dieron lugar las condiciones del terreno sobre los terremotos. Existieron gravísimos sismos en Córdoba el primer milenio (uno el año 565) y durante el segundo milenio se conocen cuarenta terremotos violentos (se salvó el Castillo por estar sobre calizas).

**CASTILLOS DE VIGILANCIA DE CALZADAS.**

*Castillo de la Cantina.*- Hachas de bronce, martillos de piedra y ánforas; en Cerro Muriano.

*Castillo Mano de Hierro.*- Al final de la cuesta Mano de Hierro en el Vacar.

*Castillo de la Vegosa.*- En Villaviciosa, Cerro del Almadenejo y también en el Cerro Cabeza de Vaca (ambos con población ibera, ruinas redondas, barros y necrópolis al Noreste).

*Castillo de la Estrella o de Espiel.*- Ruinas, aljibe, hachas pulidas, cuchillos de sílex, placa eneolítica de Carbonell, martillos y barros negros.

*Castillo de Sierra Palacios.*- Doble recinto, aljibe, hachas y cuchillos eneolíticos, hueso, cerámica de borde grueso, lascas retocadas y puntas de flecha, ruedas de molino.

*Castillo de Belmez.*- Calcolítico, torre de Aníbal, restos romanos y árabes, aljibe, actualmente conservado, torre, muralla y 6 almenas, lascas retocadas, hachas eneolíticas, cuencos de barro y necrópolis al pie.

*Castillo de Masatrigo.*- Restos romanos de una mansión familiar en el arroyo de San Pedro.

*Castillo de Maldegollado.*- En Tolote, restos y poblado romano, desaparece en el siglo XIV, ruinas en la Sierra del Cambrón, actualmente Los Blázquez.

*Castillo de Benaidar.*- En El Hoyo, al Norte de la población, desaparece en 1573, citado por Idrisi y Alfonso XI, en el término de Belmez.

*Castillo de Las Berrazas.*- Caserones romanos en el cerro de Berrazas, cobre, hierro y oro, ruinas en el término de Villanueva del Rey, próximo al Entredicho.

*Castillo Névalo o Torre de Névalo Frío.*- Ruinas en 1 h, ibero y romano, varias murallas, torres de cal y canto macizas, aljibe, torreón de 100 m<sup>2</sup>, martillos, en Villaviciosa.

*Castillo de La Peña.*- Cerca del río Cabrillas, ruinas de villares y cuevas de la Peña y Angelita (simas y venero), en Villaviciosa a 22 km por la carretera de Posadas y 5 km al Este.

*Castillejo del Pino.*- Ruinas romanas, en carretera de Posadas, a 13 km de Villaviciosa.

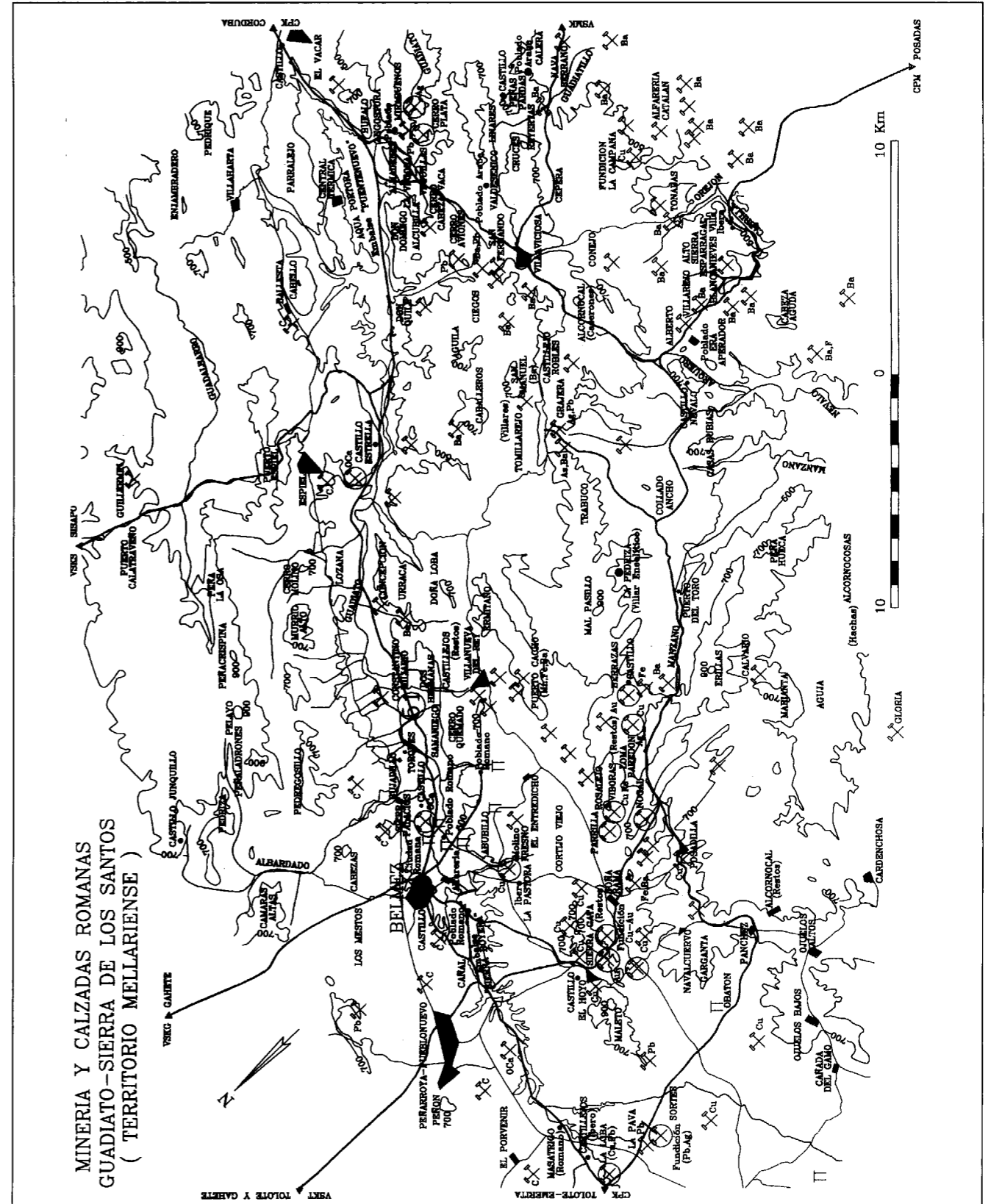
**CALZADAS ROMANAS DE BELMEZ-VILLAVICIOSA.**

Las calzadas estaban al servicio de los metales, el comercio y la guerra. La calzada romana de casi seis metros de anchura era recta, sin fuertes pendientes y con visualización continua de castillos. Consta de un firme máximo de un metro, cuya sección básica está conformada por una capa de cimientado de piedras, una capa base de grava y lascas de machaqueo, y una capa de rodadura con piedras de enlosado, trabadas con ligante de cal con arena silíceo (y algo de arcilla con alto porcentaje de óxido de aluminio); cuando se construía se cuidaban el drenaje y las cunetas, lo que garantizaba su conservación. Cada veinte millas existía una mansión de descanso para la sucesión cómoda de estaciones. Las sendas mineras tenían 3 m de anchura, fuertes pendientes y sorteaban blandones; excavadas en roca en gran parte, faltan las capas del firme cuando no eran necesarias.

En época de Augusto, la gran calzada principal Córdoba-Mérida (en adelante CPK) partía de Córdoba a Cumbre Arboles (Torre-Arboles) durante once millas, llegando posteriormente a El Vacar (mansión romana), lo que constituye los 30 km (actuales) que suponen 20 millas romanas desde Córdoba. Del Vacar a la Angostura (29 millas desde

Córdoba), luego a Don Quile (35 millas desde Córdoba) y a la Sierra de la Estrella (40 millas desde Córdoba); por la angostura del Guadiato cruzaba a la margen derecha del río (actual pantano de Puente Nuevo=Aqua Portora) y seguía por el actual Don Quile (reconocida la capa de rodadura con argamasa) hasta la Sierra de la Estrella; justo antes cruzaba nuevamente el río, por puente y también por vado.

En el pie mismo de la Sierra de la Estrella se inicia, de esta CPK y con rumbo norte, la vía secundaria —VSKS— hacia El Soldado, Los Pedroches, Sisapo y Toledo. Continuamos con la CPK a Sierra Palacios de Belmez; la traza es por la margen izquierda del río a La Lozana-Concepción (46 millas desde Córdoba), donde cruzaba el río hacia Minas de la Concepción y Dos Hermanas (51 millas desde Córdoba), cruzaba nuevamente el río a la margen izquierda hasta Sierra Palacios, apareciendo entre la vía férrea y esta sierra, luego hacia Cabeza de Vaca y hasta el Castillo de Belmez (a 57 millas de Córdoba). La ciudad de Mellaria, que se ha justificado que debe ser Belmez, está situada a 56 millas de Córdoba según Antonino. Desde Belmez partía una vía secundaria al Norte hacia Gahete —VSKG—. La CPK después transcurría por el camino del Cementerio de Belmez hacia El Cañal-paraje de Durán, y, remontando el río hasta el límite del término de Belmez, parte de esta CPK una vía secundaria al Norte —la VSKT— por el Peñón de Peñarroya a Tolote y también a Gahete, y otra calzada minera al Sur, que cruza el Guadiato, e intersecta con la calzada minera principal —CPM— en El Hoyo; esta CPM se inicia desde Belmez a Posadas (que documentaremos más adelante). Seguimos en la CPK continuando por los Huertos Familiares, y pasamos a la margen derecha del río, hacia el Cerro Masatrigo y a la mina de la Loba tomando ya rumbo Norte hacia Tolote (Los Blázquez), luego al Castillo Ducado, en el río Zújar, y de aquí, por Zalamea de la Serena, a Medellín y Mérida, donde finaliza la CPK (Idrisi refiere que se utilizó esta calzada romana de Mérida por Tolote hasta el siglo XII). Posteriormente la ruta de Extremadura fue la de Llerena, conociéndose Fuente Obejuna en el siglo XIV por sustituir a Tolote. En la fundición romana de plomo-plata de la Pava convergen dos vías secundarias; la primera es la Vía Secundaria de rumbo poniente —VSKL— desde Belmez a Azuaga y



Llerena, donde se une a la calzada de Hispalis-Emerita, que acaba de cruzar el río Viar por el Puente de los Molinos, y el flujo de ambas va a Puebla de la Reina y a Palomas (puente), luego a Alange (Puente Matachel) hasta el puente del Guadiana en Mérida. La segunda es la Vía Secundaria de rumbo sur —VSMP— (por el Puente de los Molinos sobre el Guadiato) al Obatón y Posadilla, donde se encuentra y unifica con la calzada principal minera —CPM— (procedente de Belmez).

La calzada principal minera de Belmez a Posadas —CPM— debió ser abandonada por los árabes, ya que no existen restos; partía de Belmez a Posadilla y con rumbo Sureste (el transporte de metales era hacia el río Betis), hacia las Lomas del Paredón y las Berrazas; después, se dirigía al Puerto del Toro y por el Collado Ancho a Peñas Rubias y al Castillo del Névalo, poblado de donde sale otra vía —sólo se conserva la parte central del cimientó— por el arroyo Alcornocal a Villaviciosa —VSMA— y luego por el arroyo Veguillas al Castillo de la Vegosa y al pantano de Puente Nuevo en el río Guadiato; abundan restos entre la mina Mirabuenos y la Angostura. La calzada minera —CPM— continúa en el Névalo (ya con dirección Sur) por la Era del Aperador —antiguo poblado minero de 1 h al Oeste del Villarejo alto—, siguiendo posteriormente al Sur de la Sierra Esparragal por el río Cabrilla y el castillo del Pino (villares del río Cabrilla al Sur del cerro de las Piedras), y luego al castillo de la Peña y Posadas.

El estado de conservación es pésimo, no son en general transitables, gran parte de la traza ha desaparecido al ser ocupada por fincas, y la colmatación de cunetas ha beneficiado la erosión hídrica en el centro de la calzada. Tan sólo los tramos que están ocupados por actuales caminos de acceso son transitables. Así, la capa de rodadura se ha visto repetidas veces, pero en pequeños tramos completa; entonces se observa que el trabazón del enlosado con mortero de cal y arena está perfectamente batido, presentando numerosas vacuolas redondeadas y no conexas y una meteorización de cambio de color con óxidos, presencia de cuarzo diversamente coloreado, moscovita, feldespato potásico y abundante cal apagada. Se ve sano en su interior (resistencia alta, en seco), a pesar de haberse utilizado

arena con elementos como micas y feldespatos, que no se han alterado a caolín en ningún momento. Los trozos recuperados de estas argamasas están correctamente conservados (debido al endurecimiento con el tiempo de la cal). En cuanto al enlosado, está guiado longitudinalmente con losas mayores en la parte central de la calzada, y también cada decena de metros transversalmente, en las márgenes de la calzada, donde se disponen las piedras mayores y más irregulares. Una característica de la cal es que expuesta al aire absorbe lentamente la humedad y con el CO<sub>2</sub> forma CO<sub>3</sub>Ca; por ello la argamasa endurece al aire.

La capa base suele mantenerse discontinuamente; han sido desplazadas la grava y las lascas, con pérdida mayoritaria, manteniéndose en los huecos de las piedras del cimientó. A veces está trabada con limazo, en tramos utilizados por caminos, pero aun en ellos han perdido las cunetas y se han reducido a la mitad de la anchura de la calzada.

La capa de cimientó de piedras se suele mantener en parte; es la última que se ha erosionado, al faltarle el material suprayacente (debido al deterioro de las cunetas, que ocasiona la escorrentía por el centro de la propia calzada, trasladando los materiales granulares y manteniéndose las piedras de caja de la calzada) las piedras se han movido y eliminado, y otras desocupándolas confieren alguna alineación longitudinal. Consideramos que en mucho recorrido las calzadas tienen su traza en una geología competente de difícil excavación y muy resistentes; la capa de cimientó no tenía por que ser potente, si se cuidaba con esmero la construcción de los márgenes de la calzada con grandes piedras soportadas que se suelen mantener con facilidad.

La calzada principal minera —CPM— podría no haber presentado capa de rodadura trabada con argamasa, ante la total ausencia de ésta; la cal está lejos, en las calizas del Guadiato y además es posible que los miliarios fuesen hitos naturales, al igual que también debió ocurrir para las vías secundarias. Al no estar conservadas estas calzadas, ni siquiera tramos definidos, se impone una restauración localizada en las zonas mejores y más fácilmente visitables de esta ruta geoambiental.

Por último, apreciamos que la batalla de

Aqua Portora —año 742— (ganada por los sirios a los bereberes que bajaban de Toledo; al mando de los sirios estaba Bal'ay AlQuchayr —Balch—), que facilitó posteriormente la "sirianización" en el gobierno de Córdoba consolidando la dependencia política de Damasco, según referencia de El Idrisi, tuvo lugar a 24 millas de Córdoba, distancia que corresponde al actual Puentenuevo (central térmica).

#### REFERENCIAS

1— BERNIER LUQUE, J. (1978). Córdoba, tierra nuestra. Publicaciones de CAJASUR.

2— CALVO PEREZ, B. (1995). Arqueología e Historia de la Minería. ETSIM Madrid.

3— CARBONELL TRILLO-FIGUEROA, A., 1920-1926-1929-1945-1947 BRAC.

4— CARRILLO, ALONSO (1624). De las Antiguas Minas de España. Córdoba. Reedición para el Congreso de Ingenieros Técnicos de Minas. León, 1992.

5— CARRILLO DIAZ-PINES, J. (1994). Arqueología romana de Córdoba. *Arqueología*.

6— CHIC GARCIA, G. (1991). La navegación fluvial en época romana. *Arqueología*.

7— CORZO, R. y TOSCANO, M. (1992). Las vías romanas de Andalucía. Sevilla.

8— DAZA SANCHEZ, A. y GALEA UCEDA, S. (1981). Estudio de la aplicabilidad de los métodos geofísicos a las excavaciones arqueológicas. EUITM de Belmez.

9— DAZA SANCHEZ, A. et al. (1993). Prospección de barita, hierro, cobre y oro en la zona de Las Berrazas del complejo volcánico de Sierra de los Santos —UCO—.

10— DAZA SANCHEZ, A. y HERNANDO LUNA, R. (1996). Estudio de ingeniería ambiental sobre onda aérea y vibraciones debidas al tráfico y su impacto en monumentos de Córdoba. II Simposio Internacional de Estructuras, Geotecnia y Materiales de Construcción. Universidad de las Villas. Cuba.

11— DIEZ FERNANDEZ-LOMANA, J. (1995). Homo Erectus y Arqueología. *Arqueología*.

12— FUENTES GUERRA, R. (1968). La metalurgia andaluza. Jornadas Geológico-Mineras. Homenaje a Antonio Carbonell. Córdoba. Revista *Industria Minera*, nº 98 y 99.

13— HERNANDO LUNA, R. (1969).

Bibliografía GeoMinera de Córdoba. Memorias ITGE.

14— HÜBNER (1869). C.I.L. Alemania.

15— MORENO ALONSO, M. (1995). Historia de Andalucía, vol. 1. CAJASUR.

16— RAMIREZ ARELLANO, R. (1983). Inventario histórico-artístico provincial. BRAH. Publicaciones de la Diputación provincial cordobesa.

17— RODRIGUEZ NEILA, J.F. (1985). Córdoba hispano-romana. Córdoba, II. Ed. Gever.

18— SCHULTEN, ADOLFO (1920). Hispania. Barcelona.

19— VARIOS AUTORES (1986). Libro Blanco de la Minería Andaluza. Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Junta de Andalucía.

# NORMAS DE PUBLICACION PARA LOS AUTORES

Los trabajos inéditos que se reciban para su publicación en el BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO serán revisados por un Comité editorial que decidirá si procede su publicación.

Los autores deberán atenerse a las siguientes normas:

## *Texto.*

El texto, que será completo (tablas, figuras, fotografías, etc), con pruebas en papel, irá acompañado de la correspondiente grabación en disquete, señalando en el mismo el programa y versión utilizados. Este texto se considerará definitivo. En él serán marcadas las fechas de recepción y aceptación.

Cuando en el trabajo se acompañen figuras, tablas y fotografías, el autor deberá dejar un pequeño espacio con indicación del lugar donde han de intercalarse, si es posible. En los originales de las mismas se reseñará el título del trabajo, así como el nombre de los autores.

Todos los trabajos en lengua española irán precedidos de un breve resumen en español e inglés o francés. Los de idiomas extranjeros lo llevarán en su idioma y también en español. Al final de los mismos, y en párrafo aparte, se incluirán las palabras clave, reservándose el último lugar para la localización geográfica, si la hubiere.

En todo momento los autores conservarán una copia del texto original y figuras.

## *Idiomas.*

Excepcionalmente podrán publicarse trabajos en otros idiomas (preferiblemente inglés o francés), siempre que abarquen temas sobre España.

## *Referencias.*

Se incluirá al final de cada trabajo la relación de las obras consultadas por orden alfabético de autores, empleándose las normas y abreviaturas usuales.

## *Parte gráfica.*

La parte gráfica vendrá preparada para ser reproducida a las anchuras máximas de 80 mm. (una columna) y 170 mm. (doble columna). Se evitará en lo posible la inclusión de encartes, así como se reducirá a lo indispensable el número de figuras, tablas y fotografías. En las ilustraciones a escala, ésta se expresará solamente en forma gráfica, con objeto de evitar errores en caso de reducir el original. Todas las figuras irán numeradas correlativamente según su orden de inserción.

Las figuras serán originales y nunca copiativos, delineadas con tinta china sobre papel vegetal. Las tablas, bien presentadas para su reproducción fotográfica. Las fotografías serán positivos en blanco y negro sobre papel brillo y excepcionalmente en color (positivo en brillo o transparencia).

## *Pruebas.*

Serán enviadas a los autores para que realicen las correcciones de erratas de imprenta producidas en la composición, no admitiéndose modificación alguna, adición o supresión al texto original.

Las pruebas serán devueltas por el autor en el plazo máximo de diez días, pasados los cuales la Redacción decidirá entre retrasar el trabajo o realizar ella misma la corrección, declinando la responsabilidad por los errores que pudieran persistir.

Los originales de texto y figuras quedarán en poder de la Redacción.

## *Tiradas aparte.*

Se asignan 30 tiradas aparte con carácter gratuito por trabajo publicado. Cuando el autor desee un número mayor del indicado deberá hacerlo constar por escrito en las pruebas y abonar el precio de este excedente.

La Redacción del BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO introducirá cuantas modificaciones sean necesarias para mantener los criterios de uniformidad y calidad del mismo. De estas modificaciones se informará al autor.

---

Toda la correspondencia referente a las publicaciones

deberá dirigirse a:

Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara

Jefe del Servicio de Publicaciones

Instituto Tecnológico Geominero de España

Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

# INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA

## Finalidad:

*Investigación, Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica en Geología, Minería  
Agua subterráneas, y Disciplinas conexas*



## GEOLOGIA

MAPA GEOLOGICO NACIONAL (MAGNA)  
ESTUDIOS GEOLOGICOS Y CARTOGRAFIA TEMATICA  
GEOLOGIA MARINA



## RECURSOS MINERALES

EXPLORACION MINERA E INVESTIGACION DE YACIMIENTOS  
METALOGENIA Y CARTOGRAFIA METALOGENETICA  
EVALUACION DE RESERVAS E INVENTARIO DE RECURSOS  
PROCESOS, TECNOLOGIA Y ECONOMIA MINERAS  
NORMATIVA Y SEGURIDAD MINERA



## AGUAS SUBTERRANEAS

CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA  
PROTECCION DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS  
EVALUACION Y CONTROL DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS  
RECURSOS GEOTERMICOS



## INGENIERIA GEOAMBIENTAL

RIESGOS GEOLOGICOS  
RESTAURACION DEL MEDIO AMBIENTE MINERO  
GEOTECNIA Y GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA  
ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES



## LABORATORIOS Y ENSAYOS

ANALISIS QUIMICOS Y MINERALOGICOS  
GEOQUIMICA BASICA Y APLICADA  
GEOFISICA Y TELEDETECCION APLICADA  
ENSAYOS MINERALURGICOS Y GEOTECNICOS  
CARACTERIZACION DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES  
SONDEOS MECANICOS Y ENSAYOS DE BOMBEO



## INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS

FONDOS DOCUMENTALES Y BASES DE DATOS  
LITOTECA  
SISTEMAS DE INFORMACION Y COMUNICACIONES



## SERVICIO DE PUBLICACIONES

CARTOGRAFIA TEMATICA A DIVERSAS ESCALAS  
PUBLICACIONES SOBRE GEOLOGIA, MINERIA Y CIENCIAS CONEXAS  
«BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO»  
«REVISTA ESPAÑOLA DE MICROPALAEONTOLOGIA»



## MUSEO GEOMINERO

PALEONTOLOGIA Y MINERALOGIA  
CATALOGACION Y GESTION DE COLECCIONES GEOLOGICAS  
EXPOSICIONES: TEMPORALES Y PERMANENTES  
DIVULGACION CIENTIFICA

### Sede Central:

C/Ríos Rosas, 23 - 28003 MADRID  
☎: 91/349 57 00. Fax: 91/349 57 62

### Centro de Laboratorios:

C/La Calera, 1 - 28760 TRES CANTOS (MADRID)  
☎: 803 22 00