

Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

boletín

geológico

y minero

VOLUMEN 105

Septiembre - Octubre 1994

NUMERO 5



Volumen 105

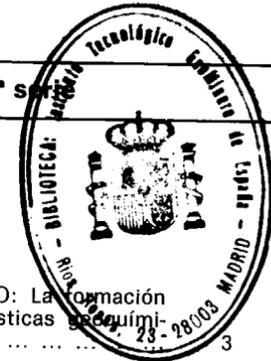
Número 5

Septiembre - Octubre 1994

boletín geológico y minero

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

22 OCT 1997



Sumario

Geología	J. C. FERNANDEZ CALIANI y M. L. GONZALEZ-REGALADO: La formación Pizarras de Coronada (Faja Pirítica Ibérica): Características geoquímicas, mineralógicas y bioestratigráficas 3
	P. LOPEZ GARCIA y J. A. LOPEZ-SAEZ: Contribución al conocimiento de la historia de la vegetación de Huesca: Análisis Palinológico del yacimiento de la Cueva del Moro (Olvena) 9
Minería	F. COSTA, A. CAMPRUBI y J. C. MELGAREJO: Aproximación geológica a las minas neolíticas de fosfatos férrico-alumínicos de Gavà (Catalunya) 18
	A. CAMPRUBI, F. COSTA y J. C. MELGAREJO: Mineralizaciones de fosfatos férrico-alumínicos de Gavà (Catalunya): tipología 26
Aguas subterráneas	D. PEREZ FRANCO: El flujo no lineal hacia pozos de extracción en acuíferos de baja conductividad hidráulica 36
	F. DILLA SALVADOR y H. R. MESA SANCHEZ: Modelos de administración óptima del acuífero Ariguanabo 43
Geoquímica	P. DE LA FUENTE, E. ALONSO, M. A. QUIJANO, A. VERGARA y M. PALENZUELA: Estudio comparativo de la determinación de Al, Pb, Co y Ni en aguas residuales y naturales por AAS e ICP-AES 50
Geofísica	J. L. PLATA TORRES y S. SOMOZA DIAZ-SARMIENTO: Aplicación del proceso de imágenes al análisis de datos gravimétricos 55
Ingeniería geoambiental	M. O. GONZALEZ, J. A. BLANCO, S. MONTERRUBIO, M. YENES y C. J. MARTINEZ: Caracterización geológico-geotécnica de la Facies Entrala (Paleógeno) en los alrededores de la Ciudad de Zamora 66
Información	O. PUCHE RIART, R. SERRANO VALVERDE, M.ª J. BERNARDEZ GOMEZ, J. C. GUISADO DI MONTI y B. CALVO PEREZ: Análisis sobre el origen de los materiales arqueológicos del Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid 79
	F. J. AYALA CARCEDO: La aportación científica y tecnológica de Jorge Agrícola (1494-1555) 91
	Noticias 96

DIRECCION Y ADMINISTRACION
Ríos Rosas, n.º 23 - 28003-Madrid
Teléf./Fax (91) 349 57 62

**INSTITUTO TECNOLÓGICO
GEOMINERO DE ESPAÑA**

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA
Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales

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.

EXPLICACION DE PORTADA

Evaporitas del Mioceno Superior de Benamaurel.
(Depresión de Baza, Granada.)

Foto: J. Rubio Navas

Depósito legal: M. 3.279 - 1958
ISSN 0366 - 0176
NIPO 241 - 94 - 001 - 4

Imprenta Ideal, S. L. - Chile, 27 - Teléf. 359 57 55 - 28016-MADRID

La formación Pizarras de Coronada (Faja Pirítica Ibérica): Características geoquímicas, mineralógicas y bioestratigráficas.

Por J. C. FERNANDEZ CALIANI y M. L. GONZALEZ-REGALADO (*)

RESUMEN

Se describen las características petrológicas y bioestratigráficas de la Formación de Coronada (provincia de Huelva). Esta formación está constituida por pizarras cloriticas con algunos lentejones de rocas carbonatadas, y se localiza estratigráficamente entre la Formación Manganesífera y el nivel de pizarras moradas, en el Complejo Volcánico-Sedimentario de la Faja Pirítica.

Los datos petrográficos y paleontológicos proporcionados por este estudio permiten precisar algunos aspectos de interés en el conocimiento de la génesis de estos materiales.

Palabras clave: Pizarras verdes, Formación Coronada, Complejo volcánico-sedimentario, Faja Pirítica Ibérica, Huelva.

ABSTRACT

The petrological, mineralogical and biostratigraphical characteristics of the Coronada Formation (Huelva province) are depicted in this paper. This formation consists of chloritic slates with a few carbonatic lenses interbedded. It is located between the Manganese Formation and the purple slates level, in the Sedimentary-Volcanic Complex of the South-Iberian Pyrite Belt.

The petrographical and palaeontological data supplied in this study allows to set several aspects of interest concerning the origin of these materials.

Key words: Green slates, Coronada Formation, Sedimentary-Volcanic Complex, Iberian Pyrite Belt, Huelva.

INTRODUCCION

La literatura de la Faja Pirítica del suroeste de España es extensa y variada, dada su gran importancia metalogenética, sin embargo no se conocen publicaciones específicas sobre los materiales pizarrosos que constituyen sus unidades estratigráficas. Sólo en algunas tesis doctorales (RAMBAUD, 1969; STRAUSS, 1970; LECOLLE, 1977; GARCIA PALOMERO, 1980, entre otros) aparecen descripciones de las características petrográficas y algunas discusiones acerca del origen volcánico o sedimentario de las pizarras, en base a escasos datos geoquímicos y mineralógicos.

Con este trabajo se pretende contribuir al conocimiento de una formación de pizarras, hasta ahora indiferenciadas, que afloran en el anticlinal de Sotiel (fig. 1), situado en el borde meridional de la Faja Pirítica, a unos 50 km al norte de Huelva.

Esta formación, que hemos denominado Coronada, tiene una potencia de unos 80 m, estimada a partir de datos de sondeos, y está constituida principalmente por pizarras verdes con unas características petrológicas y bioestratigráficas homogéneas y definidas. Además, contienen niveles interestratificados de pizarras grises y lentejones de rocas carbonatadas fosilíferas.

La Formación Coronada está bien delimitada desde el punto de vista estratigráfico: se localiza

(*) Dpto. Geología. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva. 21819 La Rábida (Huelva).

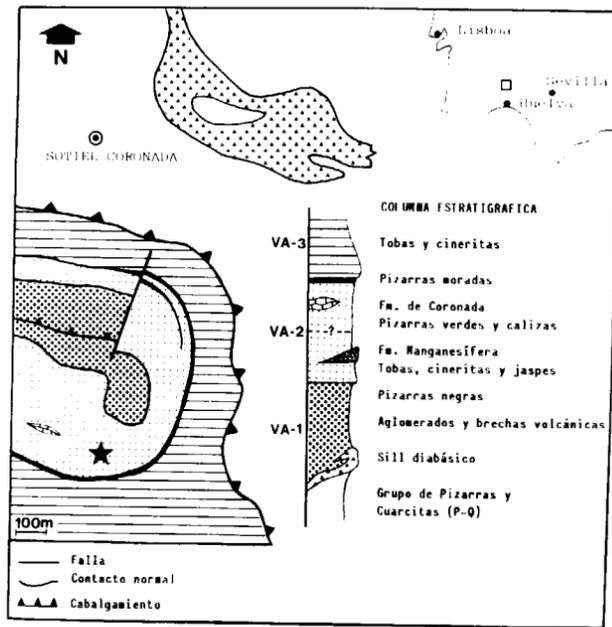


Figura 1.—Esquema geológico y columna estratigráfica del Complejo Volcánico-Sedimentario en el sector de Sotiel Coronada.

VA-1: volcanismo ácido inicial
 VA-2: volcanismo ácido intermedio
 VA-3: volcanismo ácido final
 ★ localización de la cantera estudiada

a techo del segundo episodio volcánico ácido (VA-2) del Complejo Volcanosedimentario, entre la Formación Manganesífera y el nivel de pizarras moradas (fig. 1).

METODOLOGIA

Para la caracterización químico-mineralógica y textural de las pizarras se seleccionaron siete muestras procedentes de una cantera próxima a Sotiel Coronada (fig. 1).

El análisis químico de elementos mayoritarios se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica, excepto la sílice y el óxido ferroso que fueron determinados por gravimetría y por valoración con permanganato potásico respectivamente.

El análisis mineralógico se llevó a cabo por difracción de rayos X (método de polvo y agregado orientado) en un equipo Philips PW 1130/90,

usando radiación K α de Cu filtrada por una lámina de Ni. Los difractogramas de polvo se obtuvieron en las siguientes condiciones instrumentales:

- zona explorada: 3-70° de 2 θ
- velocidad de exploración: 2°/minuto
- velocidad de carta: 20 mm/minuto
- rendijas: automáticas
- constante de tiempo: 2
- sensibilidad: 1 \times 10³ y 5 \times 10³

Los agregados orientados fueron sometidos a tratamientos adicionales (solvatación con EG y DMSO, calentamiento a 500 °C), según las técnicas habituales, y se rodaron a una velocidad de goniómetro más lenta (1°/minuto). El parámetro d de los filosilicatos se calculó a partir de la posición de la reflexión (060) en los difractogramas de polvo, operando a 0,5°/minuto en el intervalo 59-63° de 2 θ , y usando portamuestras de carga lateral y cuarzo como estándar interno.

Por último, se efectuó un estudio petrográfico por microscopía de luz transmitida y por microscopía electrónica de barrido para describir algunos rasgos texturales y microestructurales de las pizarras.

CARACTERISTICAS GEOQUIMICAS

Los aspectos geoquímicos más interesantes que se pueden destacar de los resultados obtenidos (tabla I) se ilustran en los diagramas binarios de la figura 2, donde se comparan las pizarras

TABLA I
Análisis químico de elementos mayoritarios y pérdida de peso por calcinación (P. C.) de las muestras estudiadas

	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7
SiO ₂	62,89	67,03	59,98	67,39	61,04	67,55	59,25
Al ₂ O ₃	20,10	18,10	23,50	21,00	20,10	17,60	23,00
Fe ₂ O ₃	2,23	0,81	0,69	0,52	0,86	0,20	0,56
FeO	5,22	4,86	6,36	2,67	5,64	5,54	6,25
CaO	1,87	2,05	1,96	2,12	4,35	2,32	3,09
MgO	2,46	2,57	1,39	1,46	2,00	2,39	2,03
Na ₂ O	0,01	0,11	0,02	0,05	0,06	0,18	0,03
K ₂ O	1,98	1,13	2,25	2,11	1,90	1,05	2,44
P.C.	3,50	3,02	3,93	2,95	3,43	2,99	3,72
TOTAL	100,26	99,68	100,08	100,27	99,38	99,82	100,37

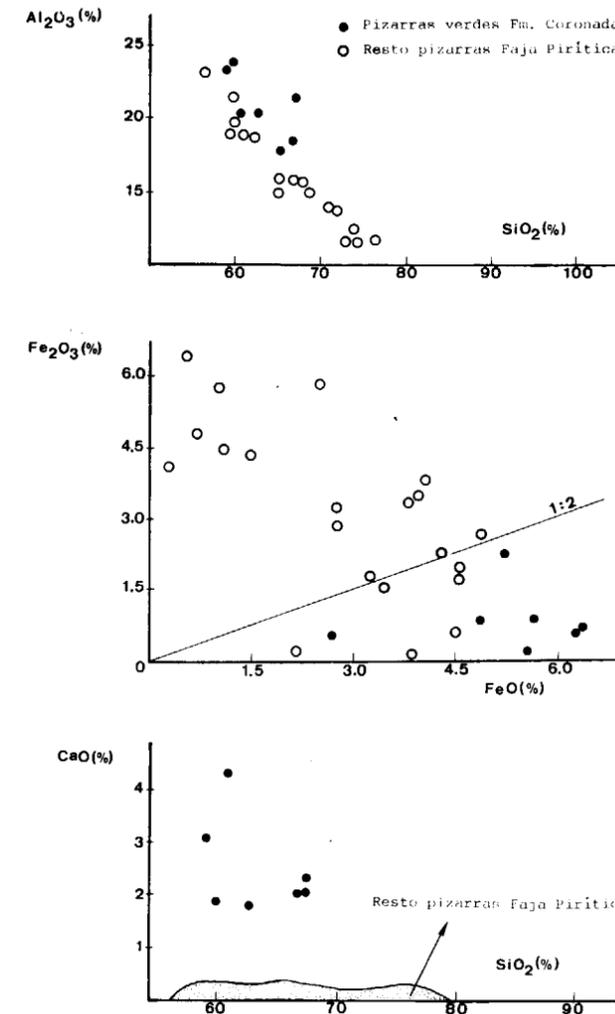


Figura 2.—Diagramas binarios de elementos mayores más característicos de las pizarras verdes.

verdes, objeto de este estudio, con las formaciones pizarrosas de la Faja Pirítica, a partir de los datos tomados de FERNANDEZ-CALIANI (1990).

Las pizarras verdes son aluminicas, suelen superar el 20 por 100 de Al₂O₃, y son ricas en hierro ferroso (presentan una relación Fe₂O₃/FeO inferior a 0,5). Además, estas pizarras se distinguen por ser más cálcicas que el resto de las formaciones pizarrosas.

MINERALOGIA

Los componentes mineralógicos fundamentales de las pizarras son cuarzo y filosilicatos (micas

y cloritas) que, en conjunto, representan más del 90 por 100 de la muestra global. También existen cantidades apreciables de feldespatos, carbonatos, óxidos de hierro y materia carbonosa, y como minerales subordinados o accesorios se ha identificado zircón, turmalina, rutilo y pirita.

Los filosilicatos son los componentes mayoritarios, dado el carácter pelítico de estas rocas. Forman agregados criptocristalinos orientados según la foliación principal, aunque algunos cristales tabulares de clorita y, en menor proporción, de mica blanca están más individualizados y presentan una mayor granulometría. Al microscopio electrónico se observa que los filosilicatos se disponen en bloques de láminas cementadas, a veces, por sílice opalina.

Las tablas II y III recogen los parámetros cristaloquímicos y la composición química aproximada de los filosilicatos, deducida por difracción de rayos X a partir de las ecuaciones experimentales propuestas por los autores que se especifican.

TABLA II
Parámetros cristaloquímicos y composición química de las micas, deducida por DRX

Muestra	H(0,0,10)	1004/1002	bo	I.C.	Si*	Al ^{iv} *	Al ^{vi} *	Fe*	Mg*	Na/Na ⁺ *
C-1	1,996	0,80	8,988	2,6	12,0	4,0	7,8	0,2	0,0	0,0
C-2	1,995	0,51	8,988	2,5	12,0	4,0	7,8	0,2	0,0	0,0
C-3	1,998	0,50	9,000	2,5	12,0	4,0	7,3	0,4	0,3	0,0
C-4	1,998	0,55	9,000	2,4	12,0	4,0	7,3	0,4	0,3	0,0
C-5	1,998	0,90	8,994	2,4	12,0	4,0	7,5	0,3	0,2	0,0
C-6	2,002	0,57	8,994	2,7	12,0	4,0	7,3	0,3	0,2	0,0
C-7	1,998	0,55	9,012	2,7	12,0	4,0	6,8	0,6	0,6	0,0

*Ernst (1963); *Martin-Rewis (1970); *Gillott (1974)

TABLA III
Parámetros cristaloquímicos y composición química de las cloritas, deducida por DRX

Muestra	d(001)	bo	I.C.	Si*	Al ^{iv} *	Al ^{vi} *	Fe*	Mg*	F/FM
C-1	14,029	9,324	2,4	2,0	2,0	1,5	3,1	1,4	0,69
C-2	14,210	9,324	2,4	2,7	1,3	0,9	3,1	2,0	0,61
C-3	14,142	9,330	2,3	2,4	1,6	1,1	3,2	1,7	0,65
C-4	14,142	9,324	2,4	2,4	1,6	1,1	3,1	1,8	0,63
C-5	14,029	9,318	2,3	2,0	2,0	1,5	2,9	1,6	0,64
C-6	14,029	9,312	2,2	2,1	1,9	1,6	2,8	1,6	0,64
C-7	14,210	9,336	2,4	2,6	1,4	0,8	3,4	1,8	0,65

*Brindley (1961); *Albee (1962); Nieto y Rodríguez-Gallego (1983)

La mica es el filosilicato más abundante. Se presenta bien cristalizada en láminas pseudo-hexagonales de bordes recortados. El índice de cristalinidad de KÜBLER (1968) es variable entre 2,4 y 2,7. De acuerdo con los valores del parámetro b_0 , son micas dioctaédricas de composición moscovítica con un bajo contenido en celadonita y, en todos los casos, se corresponden con el politipo 2M. El grado de fengitización, determinado por la relación de intensidades basales ($1004/1002$), es bajo y el grado de paragonitización, o contenido en Na respecto al total de cationes alcalinos interlaminares ($Na/Na+K$), es nulo.

La clorita es relativamente abundante en las pizarras verdes, sobre todo los porfidoblastos de coloración marrón verdosa. Su patrón de difracción corresponde con el politipo IIb de HAYES (1970). El valor medio del parámetro b_0 (9.324 Å) refleja un importante contenido en cationes pesados (fundamentalmente hierro) en la capa octaédrica. Efectivamente, según la relación F/FM, que representa a $Fe/Fe+Mg$, las cloritas son ricas en hierro, con un parámetro variable entre 0,6 y 0,7 (chamositas magnéticas). En los difractogramas (fig. 3) se comprueba que las cloritas, después de ser sometidas a un tratamiento térmico, exhiben una reflexión basal

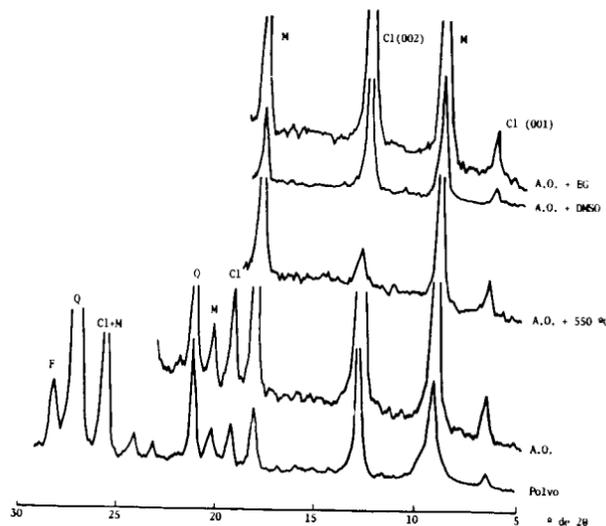


Figura 3.—Difractogramas de polvo y agregados orientados (A. O.) sometidos a tratamiento térmico y solvatados con etilenglicol (EG) y dimetilsulfóxido (DMSO).

(001) más intensa mientras que la reflexión (002) se debilita notablemente, comportamiento propio de las cloritas chamosíticas.

El cuarzo aparece, generalmente, en agregados lenticulares diseminados en la matriz filosilicatada. También se encuentran granos xenomorfos en sombras de presión y en bandas de segregación metamórfica. En algunas muestras se observan fenocristales de cuarzo subidiomorfo con bordes de corrosión.

Los feldespatos son escasos y se trata de cristales prismáticos de plagioclasa albitica. Los carbonatos aparecen rellenando microfisuras pero también son comunes los agregados policristalinos de calcita, o bien cristales aislados y dispersos en la matriz pizarrosa. Los óxidos de hierro rellenan espacios intergranulares a modo de finas diseminaciones o en forma de pequeños nódulos ferruginosos. La materia carbonosa se dispone formando mallas, regularmente repartida o en bandas oscuras de mayor concentración. La pirita es el mineral opaco más común y suele estar limonitizada. El zircón, el rutilo y la turmalina se presentan en pequeños granos muy redondeados; estos minerales accesorios formaban parte del sedimento arcilloso original como componentes detríticos.

TEXTURA Y MICROESTRUCTURA

Todas las muestras analizadas presentan una textura pizarrosa, de matriz blastopelítica, diferenciada en un dominio pelicular, definido por la orientación preferencial de los filosilicatos, y un dominio lenticular configurado por pequeñas lenticulas de agregados de cuarzo microgranular.

Los filosilicatos están orientados según la foliación principal, consistente en una fábrica planar, homogénea y continua. No obstante, también se puede apreciar láminas de micas desorientadas (fig. 4). Las lenticulas son alargadas y se disponen con el eje mayor (200-300 μ) subparalelo a la foliación. Están compuestas principalmente por cuarzo y algunos cristales laminares de clorita.

Los porfidoblastos de clorita con tamaño superior a 30 μ son los únicos elementos texturales que sobresalen de la matriz pelítica (fig. 5), junto con algunos granos detríticos de minerales pre-



Figura 4.—Detalle textural al microscopio electrónico de barrido.

cinemáticos que distorsionan puntualmente a los planos de foliación.

Otra característica textural de las pizarras verdes es la presencia de un microbandeado composicional marcado por la alternancia de bandas de diferente coloración y contenido en minerales arcillosos. A veces, presentan laminaciones de mayor granulometría, constituidas por cuarzo, carbonatos y minerales pesados. El espesor de estas láminas más limosas oscila entre 0,1 y 0,8 mm.



Figura 5.—Cristales porfidoblásticos de clorita chamosítica.

ASPECTOS BIOESTRATIGRAFICOS

El conocimiento bioestratigráfico de los materiales volcanosedimentarios es muy limitado debi-

do a la escasa información paleontológica disponible.

Los lentejones de rocas carbonatadas que aparecen intercalados entre las pizarras verdes son los materiales del Complejo Volcánico-Sedimentario que presentan mayor contenido fosilífero. Se trata de bancos, de escasa continuidad, de calizas oolíticas y calcarenitas bioclásticas (LECOLLE, 1977) donde se han reconocido crinoides, briozoos, foraminíferos y conodontos dados por VAN DEN BOOGARD y SCHERMERHORN (1975) como Viseense Inferior.

En las pizarras verdes recientemente se han determinado foraminíferos bentónicos del Suborden Fusulinina que confirman la edad, pertenecientes al género *Earlandinita* (fig. 6), cuyas características paleontológicas y bioestratigráficas han sido descritas por FERNANDEZ CALIANI y GONZALEZ-REGALADO (1990).

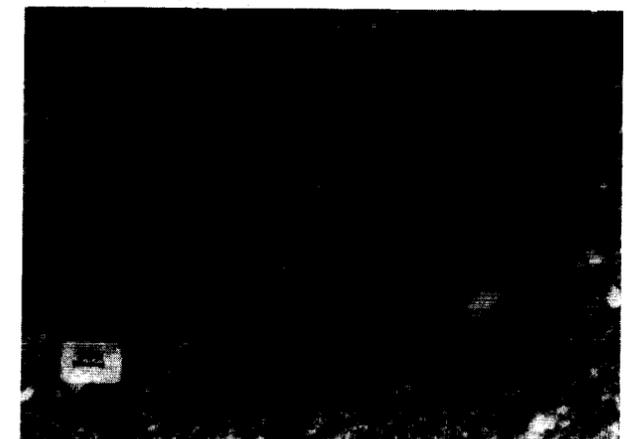


Figura 6.—Foraminífero fusulinido (*Earlandinita sp.*) englobado en una lenticula de cuarzo.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los materiales pizarrosos relacionados genéticamente con el segundo episodio volcánico ácido, a pesar de su heterogeneidad litológica, se han considerado hasta ahora como una misma formación estratigráfica en el sector estudiado.

En el Anticlinal de Sotiel, en contacto inferior con las pizarras moradas, estos materiales presentan una composición química y mineralógica que permite diferenciarlos del resto del almacén

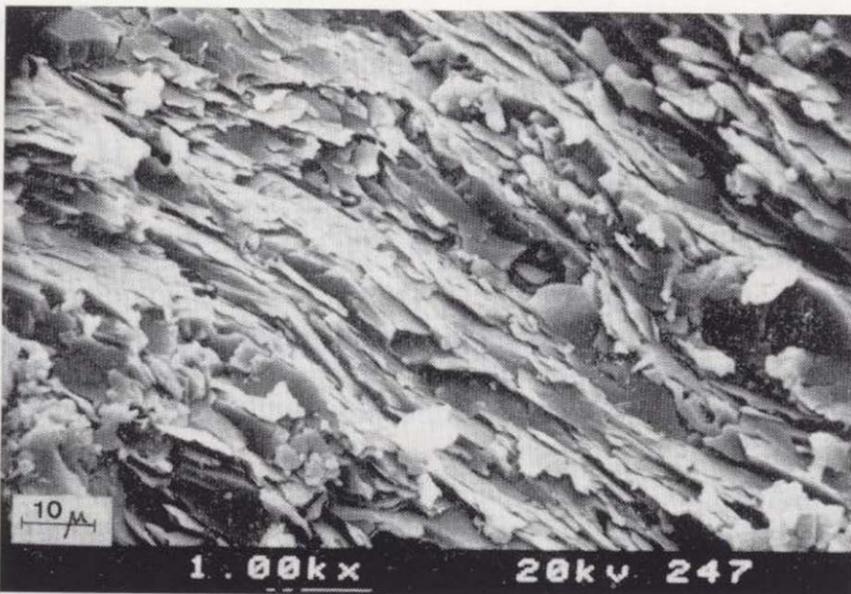


Figura 4.—Detalle textural al microscopio electrónico de barrido.

cinemáticos que distorsionan puntualmente a los planos de foliación.

Otra característica textural de las pizarras verdes es la presencia de un microbandeado composicional marcado por la alternancia de bandas de diferente coloración y contenido en minerales arcillosos. A veces, presentan laminaciones de mayor granulometría, constituidas por cuarzo, carbonatos y minerales pesados. El espesor de estas láminas más limosas oscila entre 0,1 y 0,8 mm.

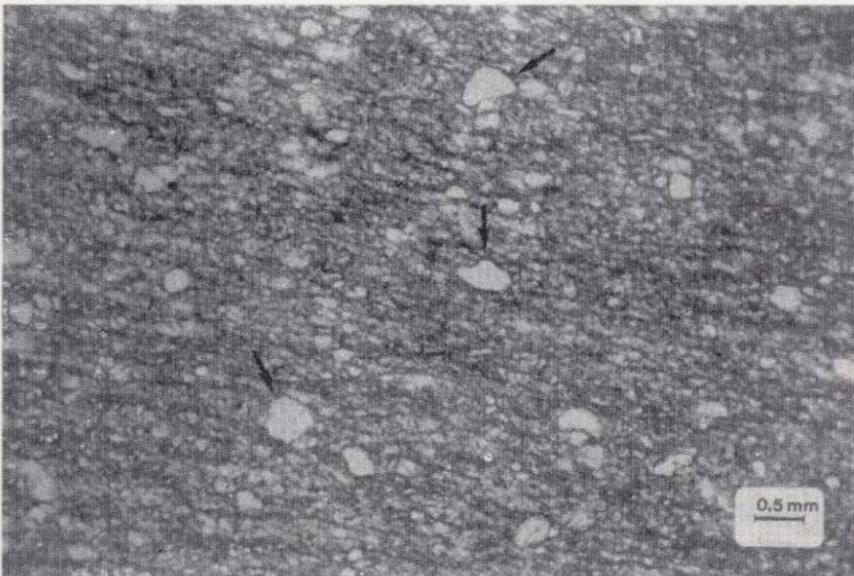


Figura 5.—Cristales porfidoblásticos de clorita chamosítica.

ASPECTOS BIOESTRATIGRAFICOS

El conocimiento bioestratigráfico de los materiales volcanosedimentarios es muy limitado debi-

do a la escasa información paleontológica disponible.

Los lentejones de rocas carbonatadas que aparecen intercalados entre las pizarras verdes son los materiales del Complejo Volcánico-Sedimentario que presentan mayor contenido fosilífero. Se trata de bancos, de escasa continuidad, de calizas oolíticas y calcarenitas bioclásticas (LECOLLE, 1977) donde se han reconocido crioides, briozoos, foraminíferos y conodontos dados por VAN DEN BOOGARD y SCHERMERHORN (1975) como Viseiense Inferior.

En las pizarras verdes recientemente se han determinado foraminíferos bentónicos del Suborden Fusulinina que confirman la edad, pertenecientes al género *Earlandinita* (fig. 6), cuyas características paleontológicas y bioestratigráficas han sido descritas por FERNANDEZ CALIANI y GONZALEZ-REGALADO (1990).

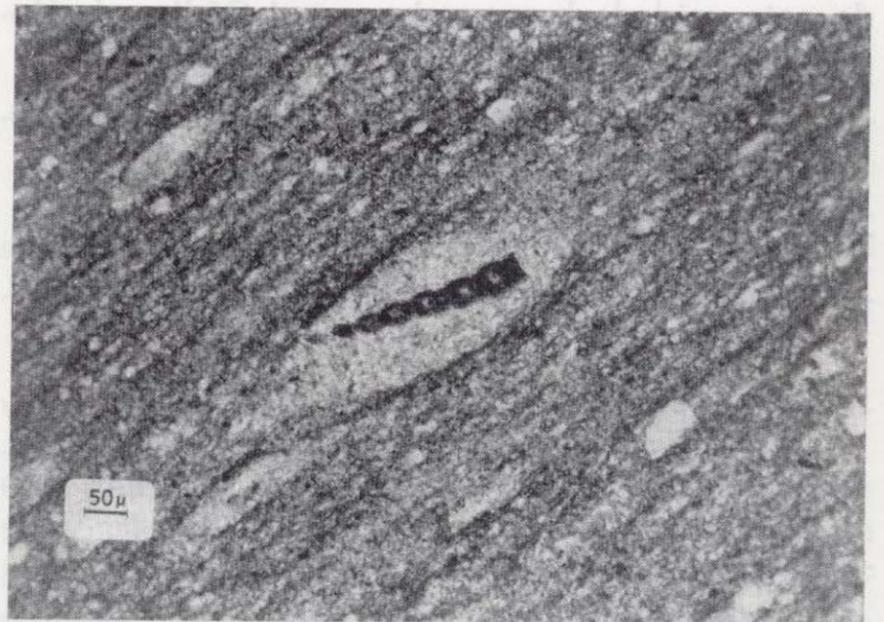


Figura 6.—Foraminífero fusilínido (*Earlandinita* sp.) englobado en una lenticula de cuarzo.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los materiales pizarrosos relacionados genéticamente con el segundo episodio volcánico ácido, a pesar de su heterogeneidad litológica, se han considerado hasta ahora como una misma formación estratigráfica en el sector estudiado.

En el Anticlinal de Sotiel, en contacto inferior con las pizarras moradas, estos materiales presentan una composición química y mineralógica que permite diferenciarlos del resto del almacén

volcanosedimentario. Son pizarras verdes de composición cuarzo-moscovíticas, con abundantes cristaloblastos de clorita chamosítica, y algunos niveles y lentejones de carbonatos.

Las pizarras contienen foraminíferos bentónicos propios de una plataforma marina abierta y somera, donde se desarrolló el depósito de los sedimentos arcillosos, durante el Viseense Inferior. Además, se han encontrado elementos volcanogénicos, como los fenocristales de cuarzo, que implican una doble alimentación: sedimentaria y volcánica.

Durante la orogenia hercínica estos materiales sufrieron una intensa deformación, con desarrollo de una foliación pizarrosa muy penetrativa, y un metamorfismo de condiciones anquizonales a epizonales que, en muchos casos, no llega a borrar los caracteres texturales primarios de las metapelitas.

Finalmente, se propone la denominación formal de esta unidad, de acuerdo con el Código de Nomenclatura Estratigráfica:

- *Denominación:* Formación Pizarras de Coronada.
- *Area tipo:* Anticlinal de Sotiel.
- *Sección tipo:* Ermita Virgen de Coronada, Sotiel Coronada.
- *Coordenadas:* 37° 35' 32" de latitud N y 6° 50' 50" de longitud O (meridiano de Greenwich).
- *Límites:*
 - Inferior: concordante con la Fm. Manganesífera.
 - Superior: concordante con las pizarras moradas.
- *Potencia:* Estimada en unos 80 m.
- *Encuadre bioestratigráfico:* La formación comprende la Biozona de *Anchoralis*, basada en conodontos y definida por VAN DEN BOOGARD y SCHERMERHORN (1975).

REFERENCIAS

ALBEE, A. L. (1962): *Relationships between the mineral chemical composition and physical properties of the chlorite series*. Am. Mineral., 47, 851-870.

BRINDLEY, G. W. (1961): *Chlorite minerals*. In: The X-ray identification and crystal structures of clay minerals. G. Brown ed., Mineral. Soc., 6, 242-296.

ERNST, W. G. (1963): *Significance of phengite micas from lowgrade schists*. Am. Mineral., 48, 1357-1373.

FERNANDEZ CALIANI, J. C. (1990): *Estudio mineralógico y aplicaciones industriales de los materiales pizarrosos de la Faja Pirítica (Sector Anticlinorio de Valverde del Camino, Huelva)*. Tesis de Licenc., Unic. Sevilla, 219 pp. (Ined.).

FERNANDEZ CALIANI, J. C. y GONZALEZ-REGALADO, M. L. (1990): *Presencia de foraminíferos en las pizarras carboníferas de Sotiel Coronada (Huelva). Nuevos datos sobre el Complejo Volcánico-Sedimentario de la Faja Pirítica del SO de España*. Bol. Geol. Min., 101 (5), 3-9.

GARCIA-PALOMERO, F. (1980): *Caracteres geológicos y relaciones morfológicas y genéticas de los yacimientos del anticlinal de Riotinto*. Inst. Est. Onubenses, Huelva, 262 pp.

GUIDOTTI, C. V. (1974): *Transition from staurolite to sillimanite zone, Rengeley quadrangle, Maine*. Geol. Soc. Amer. Bull., 85, 475-490.

HAYES, J. B. (1970): *Polytypism of chlorite in sedimentary rocks*. Clays Clay Min., 18, 285-306.

KÜBLER, B. (1968): *Evaluation quantitative du metamorphisme par la cristallinité de l'illite. Etat des progrès réalisés ces dernières années*. Bull. Centre Rech. Pau (SNPA), 2, 385-397.

LECOLLE, M. (1977): *La Ceinture Sud-Ibérique: un exemple de province a amas sulfures volcano-sedimentaires*. Thèse Univ. P. et M. Curie, París, 609 pp.

MARTIN-RAMOS, J. D. (1976): *Las micas de las cordilleras Béticas*. Tesis Doctoral, Univ. Granada, 244 pp.

NIETO, F. y RODRIGUEZ-GALLEGO, M. (1983): *Metodología para el estudio de la clorita en rocas metamórficas*. Soc. Ital. Min. Petrol., 38 (3), 1429-1436.

RAMBAUD, F. (1969): *El sinclinal carbonífero de Riotinto y sus mineralizaciones asociadas*. Mem. Inst. Geol. Min. Esp., vol. 71, 229 pp.

STRAUSS, G. K. (1970): *Sobre la geología de la provincia piritifera del suroeste de la península Ibérica y de sus yacimientos, en especial sobre la mina de piritita de Lousal (Portugal)*. Mem. Inst. Geol. Min. Esp., vol. 77, 266 pp.

VAN DEN BOOGARD, M. y SCHERMERHORN, L. J. G. (1975): *Conodont faunas from Portugal and southwestern Spain. Part 2: A Famennian conodont fauna at Cabeza del Pasto. Part 3: Carboniferous conodonts at Sotiel Coronada*. Scripta Geol., n.º 28, 43 pp.

Original recibido: Enero de 1994.
Original aceptado: Abril de 1994.

Contribución al conocimiento de la historia de la vegetación de Huesca: Análisis Palinológico del yacimiento de la Cueva del Moro (Olvena).

Por P. LOPEZ GARCIA (*) y J. A. LOPEZ-SAEZ (**)

RESUMEN

Los análisis polínicos realizados en el yacimiento arqueológico de la cueva del Moro, en la localidad oscense de Olvena, corresponden a niveles que, culturalmente se sitúan entre el Neolítico final y la Edad del Bronce, encuadrables climáticamente, a la transición entre los periodos Subboreal-Subatlántico. Los resultados obtenidos muestran una vegetación de tipo mediterráneo, donde la influencia del hombre es patente en la presencia de pólenes tipo cereal y en las plantas ruderales que les acompañan.

Palabras clave: Palinología, Acción antrópica, Holoceno, Huesca.

ABSTRACT

The results of pollinic analysis from Cueva del Moro (Huesca) site are presented. After considering the present vegetation and the data collected on the history vegetation, the conclusion reached is that the pollinic sequences established belong to the transition from the Subboreal to the Subatlantic period.

Key words: Palynology, Human influence, Holocene, Huesca.

INTRODUCCION

En un primer trabajo sintético que realizamos (LOPEZ GARCIA, 1978) se recogieron todos los análisis palinológicos referentes al Holoceno de la Península Ibérica, procedentes tanto de depósitos higroturbosos como de yacimientos arqueológicos.

Años más tarde, López García (1986) ofrecía una nueva síntesis de los resultados hasta entonces conocidos, que venían a completar el panorama de los estudios que sobre la historia de la vegetación de la Península Ibérica se habían realizado, poniéndose de manifiesto la escasez de estudios centrados en medios arqueológicos y la necesidad de que éstos prosperen.

Con este análisis hemos pretendido complementar los estudios paleopalínológicos realizados en la Comunidad de Aragón mediante la presentación de los resultados procedentes de las investigaciones llevadas a cabo en el yacimiento arqueológico de la Cueva del Moro, que presenta una ocupación desde el Neolítico antiguo hasta el Bronce final, si bien las muestras analizadas corresponden, casi en su totalidad, a la Edad del Bronce, período en el que la actividad del hombre se refleja de modo claro en todo el ámbito peninsular, condicionando las estructuras del tapiz vegetal.

LOCALIZACION

El yacimiento se encuentra situado en un gran macizo calizo, próximo a la localidad de Olvena, sobre el río Esera, poco antes de su desemboca-

(*) Departamento de Prehistoria. C.E.H. C.S.I.C. Madrid.
(**) Departamento de Biología Vegetal I. Facultad de Biología. Universidad Complutense. Madrid.

dura en el Cinca, estando su cota a 450 metros sobre el nivel del mar.

La cueva se ha formado por fenómenos de tipo cárstico a partir de calcarenitas, encontrándose en la actualidad prácticamente fosilizada, y sin ninguna actividad. Se trata, como indican los autores del trabajo arqueológico, de un conjunto de fisuras y galerías de disposición oblicua observables desde la carretera que conduce a la localidad próxima de Graus. (UTRILLA, P.; J. M. RODANES, y J. REY, 1993).

Arqueológicamente se distinguen dos conjuntos bien diferenciados: el superior con niveles del Neolítico antiguo, y el inferior, con un desarrollo interno muy complicado, que se ocupó durante la Edad del Bronce.

ESTRATIGRAFIA

Presentamos la estratigrafía de las campañas arqueológicas de 1982 y 1983 ya que se trata de los niveles sobre los que tomamos las muestras. (UTRILLA, RODANES y REY, 1993: 566).

- Nivel superficial con fragmentos de cerámica de época romana.
- Nivel a1: color gris, con hoyos de cenizas.
- Nivel a2: marrón, con piedrecillas y carbones.
- Nivel a3: gris claro, con idéntica textura que el a1.
- Nivel a4: marrón oscuro, sin apenas carbones, pero con abundantes semillas y hojitas.
- Nivel b1: marrón, con pequeñas piedrecillas, casi estéril arqueológicamente.
- Nivel b2: Negro, con muchos carbones.
- Nivel b3: capa compacta de color amarillo-grisáceo, de textura arcillosa y fina, y generalizada en toda la cueva. Separa los niveles del Bronce final (serie b), de los del Bronce antiguo y medio (serie c).
- Nivel c1: marrón, con piedrecillas y algunos carbones, separado del nivel inferior por una capa de piedras planas y molinos reutilizados.
- Nivel c2: multicolor, en negro, rojo y gris

claro, según el impacto de las zonas de hogares, con abundantes losas planas y planchas de piedra. Fechado en el 1480 ± 35 BC.

- Nivel c3: marrón, de textura suelta y con piedrecillas.
- Nivel c4: gris, excavado en cubeta sobre los niveles inferiores. Fechado en el 1570 ± 70 BC.
- Nivel c5: marrón, suelto y de textura arenosa. Corresponde al Neolítico final, fechado en el 3210 ± 80 BC.
- Nivel d1: capa de barro compacta, en ocasiones separadas del c5 por una capa estalagmítica con crecimiento de cristales, con una posible indicación de clima húmedo y encharcamiento ocasional.

FAUNA

Los datos que ofrecen los autores de la publicación ya mencionada (UTRILLA, RODANES y REY, 1993) se refieren a un análisis preliminar de la economía de los ocupantes del yacimiento en sus distintas etapas de ocupación. Los restos de fauna presentes responden, tanto a animales cazados como domésticos, destacando entre los primeros el ciervo, caballo, corzo, jabalí y uro, siendo los domésticos los bovinos, ovicaprinos y cerdo. No parece existir una gran diferencia entre los distintos niveles de la Edad del Bronce, aunque sí son significativas las variaciones respecto a los niveles neolíticos, dominando en estos últimos la fauna salvaje (59,5 %) frente a la doméstica. No queda registrada la presencia de cerdo en los últimos, estando atestiguados los restos de jabalí, especie casi ausente en los niveles de la Edad del Bronce, y única entre los salvajes junto al ciervo. La presencia de lobo, zorro, linco, gato montés y tejón queda atestiguada en toda la secuencia.

Como conclusión puede señalarse que se observa el paso de una economía de caza a una mixta donde la domesticación comienza a ser importante, destacando la ausencia total de équidos.

La avifauna está representada fundamentalmente por palomas, perdices, cornejas, urracas, águilas imperiales y cernícalos.

VEGETACION ACTUAL

Fitogeográficamente se encuadra en un territorio cuya vegetación potencial corresponde al encinar mesomediterráneo manchego y aragonés basófilo, *Bupleuro rigidi - Quercetum rotundifoliae* (RIVAS MARTINEZ, 1987). No obstante, y como consecuencia de la variabilidad de los pisos bioclimáticos, y por ende, de las formaciones vegetales a lo largo de los últimos períodos del Cuaternario, en base a distintas fluctuaciones climáticas o actuaciones de origen antrópico, en nuestro estudio no sólo nos referiremos a la vegetación potencial anexa al territorio en la actualidad, sino a todas aquellas que por su cercanía al yacimiento, puedan haber colaborado con sus aportes de polen al análisis llevado a cabo en la Cueva del Moro.

En base a lo anteriormente expuesto, serán distintas series de vegetación las que nos interesen, ya que de ellas puede proceder parte del contenido polínico del análisis realizado, siendo las que a continuación exponemos:

- Serie mesomediterránea manchega y aragonesa basófila de *Quercus rotundifolia* o encina (*Bupleuro rigidi-Querceto rotundifoliae* S.) encinares. Esta serie corresponde a la que se desarrolla en el territorio donde se ubica la Cueva del Moro.
- Serie mesomediterránea murciano-almeriense, guadiciano-bacense, sebatense, valenciano-tarraconense y aragonesa semiárida de *Quercus coccifera* o coscoja (*Rhamno lycioidi-Querceto cocciferae* S.), coscojares.
- Serie montana pirenaica y supramediterránea aragonesa de la encina o *Quercus rotundifolia* (*Helleboro foetidi-Querceto rotundifoliae* S.), encinares.
- Serie supra-mesomediterránea tarraconense, maestracense y aragonesa basófila de *Quercus faginea* o quejigo (*Violo willkommii-Querceto fagineae* S.), quejigares.
- Series altimontanas pirenaicas calcícolas del pino albar o *Pinus sylvestris*: oriental (*Polygalo calcareae-Pineto sylvestris* S.) y central (*Echinosparto horridi-Pineto sylvestris* S.), pinares.
- Geoserie riparia basófila mediterránea: olmedas.

Como ya se ha comentado con anterioridad, la vegetación climática propia de la zona de estudio es la correspondiente al encinar aragonés basófilo mesomediterráneo. Este carrascal suele poseer un porte bajo y achaparrado, de escasa cobertura, ya que las dificultades que encuentra la encina para desarrollarse son grandes, ante las enormes condicionantes climáticas y edáficas, delimitadas sobre todo por la marcada continentalidad del clima y la fuerte xericidad reinante, sólo comparables en la Península a las llanuras manchegas (ARROYO, 1988). Precipitaciones de 400 mm anuales dan lugar a un clima «mediterráneo muy seco», de tendencia continental y ombroclima semiárido. Como consecuencia de ello, la vegetación es en cambio rica en formaciones de nanofanerófitos y caméfitos, principalmente biotipos arbustivos tales como coscojas, aulagas y otros matorrales de escaso porte de cistáceas y labiadas, que en conjunto constituyen las distintas etapas seriales de degradación de la vegetación climax. A pesar de ser un bosque mediterráneo, el encinar aragonés es pobre en especies, como consecuencia del mismo clima, de ahí la ínfima representación del estrato muscinal, que es sustituido en cambio por una riqueza sin par de líquenes. La escasez de precipitaciones determina largos períodos de desecación de los horizontes edáficos, que retardan la formación y evolución de los suelos, cuya capacidad de retención de agua y movilización de nutrientes es por ello limitada (FERNANDEZ GONZALEZ, 1986). Ante tales condiciones la recuperación de los ecosistemas es nula o extremadamente lenta. Por otra parte, este encinar potencial ha sido muy alterado por el hombre, ya que la mayor parte del territorio ha sido roturado para la implantación de cultivos de cereal y leguminosas al borde del Ebro, habiéndose conservado pequeños bosquetes de la vegetación autóctona potencial en aquellos enclaves topográficamente infértiles para la agricultura. Pero incluso, el pastoreo y la deforestación para la obtención de madera de leña, base en otro tiempo de la economía regional, ha sido fuente de perturbación y desaparición de estos encinares (BRAUN-BLANQUET y BOLOS, 1987).

Todos estos hechos nos harán comprender el aspecto desolado y estepario que presentan hoy muchos paisajes semiáridos. Distintas formaciones arbustivas o subarbustivas forman hoy el paisaje, sustituyendo al carrascal o encinar pri-

mitivo y potencial: esplegueras, romerales, espartales, jabunales, tomillares, coscojares, etc. La utilización de combustibles fósiles y el abandono de los usos agrícolas tradicionales y de la ganadería extensiva está permitiendo la regeneración del encinar desde la década de los 50-60, aunque los fuertes impedimentos que la climatología antepone no permiten que dicha recuperación sea al menos lenta.

No obstante, la Depresión del Ebro, en la cual se ubica el yacimiento, y zonas limítrofes, presenta unas características de clima y vegetación únicos en Europa, pues en un área tan reducida se observa un gradiente de variación del paisaje que va, desde los húmedos hayedos del Moncayo a los áridos paisajes subdesérticos del centro de la depresión. Esto le confiere un interés biogeográfico excepcional, ofreciendo un magnífico ejemplo de zonación, más o menos concéntrica, de paisajes vegetales, que manifiestan un xerofitismo creciente desde los bordes al centro de la triangular zona que delimita el valle del Ebro (PEINADO y RIVAS MARTINEZ, 1987).

En cuanto al coscojar, éste se instala en el área central de la Depresión del Ebro, la cual no reúne condiciones para el desarrollo del encinar. La clímax de esta zona es una maquía poco densa de coscoja (*Quercus coccifera*), cambrón (*Rhamnus lycioides*), enebro (*Juniperus oxycedrus*) y sabina negral (*Juniperus phoenicea*). No se deben confundir estos coscojares potenciales con la misma asociación vegetal que supone la primera etapa de degradación seria del encinar climácico. Aunque estos coscojares son la misma asociación que los coscojares manchegos, el aragonés posee ciertos elementos termófilos como el pino de alepo (*Pinus halepensis*), el lentisco (*Pistacia lentiscus*), la sabina negral y otros elementos levantinos de los que carece el coscojar manchego, por lo que pueden aceptarse razas geográficas de una misma asociación vegetal, variantes, pero no asociaciones diferentes (IZCO, 1984). El pino de alepo es frecuente en los niveles inferiores y cálidos del piso bioclimático, mientras que la sabina albar (*Juniperus thurifera*) se sitúa en las pocas elevaciones existentes, donde la continentalidad es más acusada. Estas formaciones de sabina albar presentan numerosas introgresiones de elementos propios de las series esclerófilas, tales como la propia coscoja, la efedra (*Ephedra*) y la sabina negral. De los

antiguos bosques sabineros, así como del pinar, quedan escasísimas representaciones, pues las mismas razones de aprovechamiento maderero del encinar condujeron a la eliminación de éstos otros bosques.

Hacia el norte del yacimiento, la tendencia medioeuropea y eurosiberiana se deja sentir en la vegetación, de ahí que en el piso supramediterráneo nos encontremos con un encinar distinto al anterior, es el encinar montano pirenaico aragonés, que sufre un régimen de lluvias mayor, durante un lapso de tiempo igualmente largo en comparación con el mesomediterráneo aragonés. Asentado igualmente sobre sustratos básicos, este encinar presenta a menudo elementos florísticos del quejigar, formación con la que suele competir por ocupar el espacio y con la que establece notables correlaciones. Como formación forestal, es mucho más cerrada que el anterior y por ello, la encina presenta un desarrollo menor delimitado por una mayor sombra. No obstante, la mano del hombre también se ha dejado sentir, pero en menor medida que en el encinar de los semiáridos, pues la topografía más abrupta supone un impedimento a la agricultura, de ahí que su uso haya sido básicamente ganadero o maderero.

Por encima de este encinar se instala el quejigar montano, bosque pirenaico por excelencia, que se desarrolla sobre un clima submediterráneo de tendencia centroeuropea, aunque el 10-15 % de sus elementos sean mediterráneos. La especie arbórea dominante es el quejigo (*Quercus pubescens*) que hibrida frecuentemente con otro quejigo (*Quercus faginea*), dando una nueva especie híbrida (*Quercus x cerrioides*). Especies acompañantes son distintas especies de arces (*Acer campestre*, *Acer opalus*), *Sorbus aria* y *Pinus sylvestris*. No es una formación excesivamente cerrada aunque sí densa, lo que permite un fuerte desarrollo del estrato arbustivo, sobre todo de una de las especies más representativas de la vegetación prepirenaica submediterránea, el boj (*Buxus sempervirens*), al que acompañan *Viburnum lantana*, *Amelanchier ovalis* y *Juniperus communis*. Sin lugar a dudas, el quejigar gracias a las numerosas especies arbóreas y arbustivas que lo forman, en su mayoría planifolias, es uno de los más bellos paisajes que se pueden observar, sobre todo en épocas otoñales.

En cuanto a los pinares altimontanos pirenaicos sólo queremos hacer mención a su existencia, por la posibilidad de aporte de polen de *Pinus* al entorno del yacimiento, gracias a la facilidad que tiene el alado polen de pino para trasladarse a grandes distancias. En dichos casos, la especie que aportaría el polen es el pino albar o silvestre (*Pinus sylvestris*) también acompañante del quejigar, que suele formar un piso único por encima de éste. En zonas propiamente pirenaicas, el pino albar suele acompañar al abeto para ceder luego paso a las formaciones mixtas de hayedo-abetal. En algunos puntos del Pirineo existen además formaciones acantonadas en topografías rupestres muy abruptas de *Pinus uncinata*.

Finalmente, la vegetación riparia estaría representada por las olmedas de *Ulmus minor*, acompañadas de alamedas (*Populus sp.*) y fresnedas (*Fraxinus sp.*), cuya representación actual se reduce a enclaves relícticos, ya que la mayor parte del territorio ha sido sustituida por cultivos de regadío principalmente de leguminosas, tanto en la ribera del mismo Ebro como en las de sus afluentes. Los almendros y olivares son igualmente frecuentes como cultivos secundarios en el territorio.

MATERIAL Y METODOS

El material de análisis procede de la sala inferior, de la secuencia del Bronce Antiguo al Bronce Final-Hierro Inicial (series a, b y c).

Se tomaron un total de 17 muestras, desde los 85 cm a los 170 cm de profundidad en la secuencia estratigráfica antes descrita.

El tratamiento químico utilizado ha sido el clásico (CIH, FH, KOH) según López García (1984), con concentración del polen en licor de Thoulet (GOEURY y BEAULIEU, 1979), tinción de la muestra con fuschina básica y montaje en glicerol para su observación al microscopio óptico.

En la preparación de las muestras se utilizó un agitador de ultrasonido (Branson, modelo 250/450 Sonifier), así como filtros de fibra de vidrio (type ALE) de 25 mm de Gelman Ciencias para la separación de la fracción polínica del licor de Thoulet.

Con los resultados obtenidos se ha elaborado

el diagrama polínico correspondiente (fig. 1), en el que figuran el número de palinomorfos por muestra, los porcentajes de cada uno de los taxa procedentes del análisis polínico, así como la curva AP/NAP que relaciona los valores de polen arbóreo/no arbóreo en cada momento del diagrama polínico.

RESULTADOS Y DISCUSION

La primera y más obvia información que nos aporta el diagrama polínico es el alto porcentaje de polen arbóreo (A.P.) que se observa en todo momento. Este, es más o menos constante, experimentando dos máximos a los 130 y 120 cm de profundidad de un 85 y 65 % del polen total.

Quercus aparece de manera constante a lo largo de todo el perfil aunque sus niveles son ínfimos, generalmente no superiores al 5 % del A.P.

En cambio, *Pinus* posee dos máximos coincidentes con los del A.P. general, y en el caso de la muestra a los 130 cm, el máximo de *Pinus* coincide con la desaparición de *Quercus*, lo que puede ser indicativo de momentos de mayor rigurosidad climática y progresión del pinar en contra del *Quercetum mixtum*.

Importante es la aparición del tilo (*Tilia*) en los momentos iniciales del diagrama (170 cm) en porcentajes de un 4 %, y de forma residual a los 120 cm; indicando con su presencia, la supervivencia en el interior del *Quercetum mixtum* de táxones de ámbitos más termófilos que, serían más abundantes durante el período climático del Atlántico (momentos iniciales del diagrama), pero que tienden a refugiarse en los enclaves particularmente favorables con el empeoramiento climático del Subboreal. La aparición al mismo tiempo que *Salix* y *Oleaceae* es muestra de una cierta mejoría climática pero en el hábitat propio del tilo, que no en la climatología general, la cual es de empeoramiento progresivo, permitiendo el desarrollo del pinar.

La fuerte presencia de la hiedra (*Hedera*) con valores porcentuales superiores al 20 %, unidos al máximo de A.P., y máximos también en los niveles de distintos pteridófitos (*Polypodium*, *Monoletes*) es claramente indicativa de una mayor humedad ambiental, realmente alta,

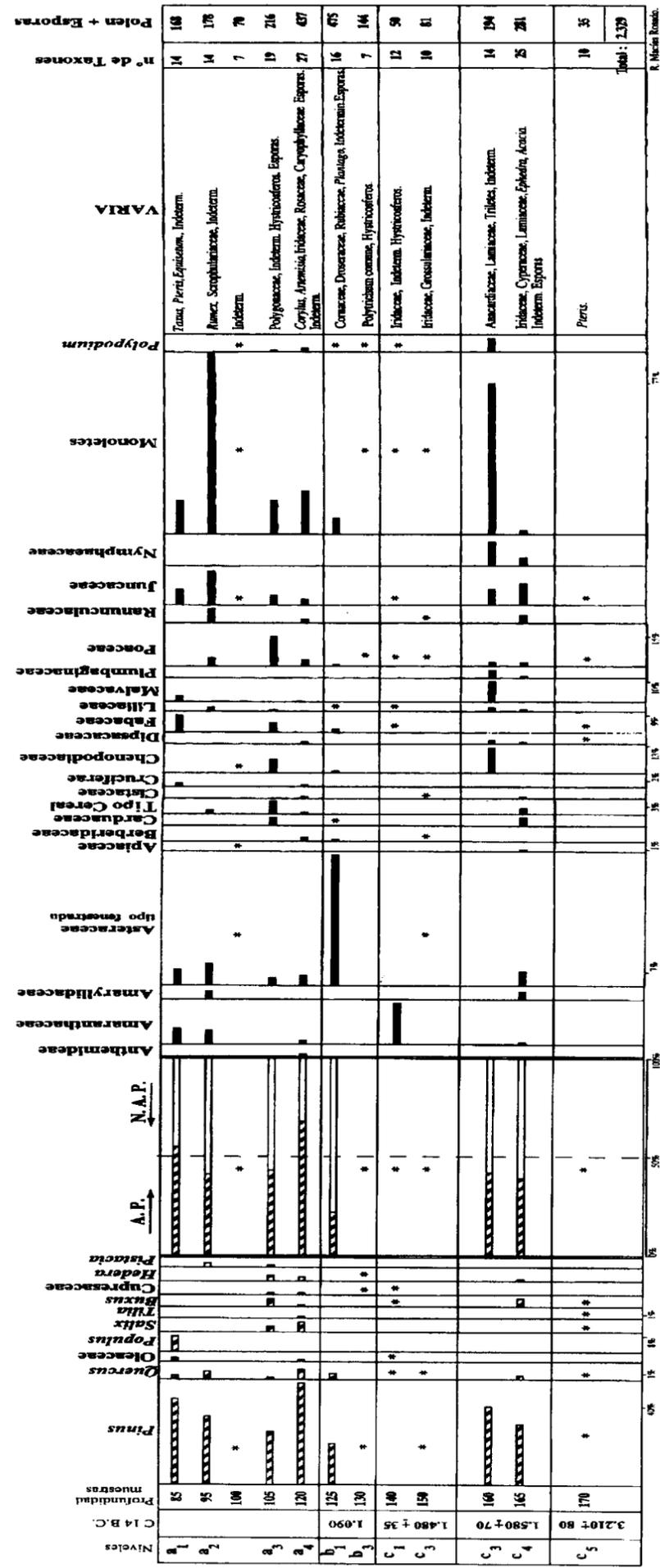


Figura 1.—Diagrama polínico del yacimiento de la Cueva del Moro (Olivena, Huesca).

para permitir el progreso excepcional de plantas generalmente umbrófilas, necesitadas de una humedad ambiental relativamente alta. Estos momentos en los que los niveles de agua, ambiental y edáfica, son altos en comparación con otros del diagrama, quedan claramente definidos a los 170, 140 y 130 cm de profundidad, gracias a la aparición conjunta de un elenco de especies favorecidas por tal hecho: *Hedera*, *Polypodium*, *Iridaceae*, *Juncaceae* (juncaceas), *Fabaceae*, *Liliaceae*, *Nymphaeaceae* (nenúfares), *Ranunculaceae*, *Buxus*, *Apiaceae*, etc.

La presencia de *Pistacia* y *Ephedra* a los 160, 105 y 95 cm, instantes después de los anteriormente nombrados, son muestra de momentos de mayor termicidad, posteriores a la retirada del nivel de agua.

El avellano (*Corylus*) aparece residual y puntualmente a los 120 cm, lo cual apoya la tesis antes adelantada de encontrarnos en estadios climáticos posteriores al atlántico.

A partir de los 125 cm se detecta de manera constante polen tipo *Cereal*, puntual a los 165 cm. El aumento de los cultivos cerealísticos así como de los de regadío (leguminosas, con un máximo a los 85 cm) supone además un aumento en la aparición de distintas especies favorecidas por la antropización y nitrificación del medio. Así, junto al alto porcentaje de polen tipo cereal, ven aumentar también sus valores las *Malvaceae*, *Rumex*, *Brassicaceae*, *Amaryllidaceae*, *Amaranthaceae* *Asteraceae fenestradas*, etc.; en general, todas ellas malas hierbas de cultivos.

Por contra, las *Carduaceae* y *Anthemideae* no se ven alteradas, lo que indica un aprovechamiento continuo de los cultivos y no su abandono, en cuyo caso aumentarían significativamente los niveles de tales táxones.

En conclusión, el paisaje que denota el diagrama sería el circunscrito a períodos climáticos correspondientes al Subboreal y principios del Subatlántico, con posibilidad de que la parte inferior del perfil pueda atribuirse al período Atlántico, en base a la aparición de *Tilia*.

Dominarían formaciones mixtas de *Pinus* y el *Quercetum mixtum*, muy empobrecido este último como consecuencia de la rigurosidad climática, que selectivamente iría eliminando distintas especies de árboles caducifolios, sobre todo

aquellos menos resistentes a los cambios climáticos, o aquellos que no hubieran encontrado un nicho particular donde refugiarse y permanecer como especies relictas, salvaguardadas del empeoramiento climático regional. El robledal mixto iría cediendo paso a los matorrales acompañantes en su sotobosque, generalmente de carácter submediterráneo, tales como el boj (*Buxus*), agracejo (*Berberis*), sauces (*Salix*), etc., que prepararían la progresión del bosque caducifolio en momentos de mejoría climática. Cabe la posibilidad de una cierta progresión de los *Quercus* hoy dominantes, encinas (*Q. rotundifolia*) y coscojas (*Q. coccifera*); mucho más resistentes a la rigurosidad del semiárido que se iba instalando, tal y como ocurre en la actualidad, donde la aparición de *Artemisia*, *Ephedra* y la abundancia de cultivos cerealísticos es muestra de lo antes expuesto.

A partir del Subatlántico se cultiva asiduamente el cereal así como, en menor medida, leguminosas, aumentando los porcentajes de malas hierbas de cultivo, sin al parecer, verse afectado de forma importante el bosque climático.

CONCLUSIONES

El estudio palinológico llevado a cabo en la Cueva del Moro muestra una secuencia donde el A.P./N.A.P. está en torno al 50 %, a excepción del nivel 130 cm donde alcanza el 80 % por el alto porcentaje de los arbustos trepadores. La parte inferior del diagrama muestra un predominio de los *Pinus* seguido de *Quercus*, *Tilia* y *Buxus*. Entre las herbáceas están presentes las gramíneas, polen tipo cereal, y otras ruderales.

La presencia de juncáceas, helechos y otro variado elenco de plantas acuáticas viene definida en función de la cercanía a una corriente fluvial. El tilo, que desaparece en momentos posteriores, supone paralelamente la disminución del porcentaje de árboles.

La parte final del diagrama presenta momentos de humedad creciente con el consiguiente aumento porcentual de pólenes atribuibles a la hiedra, sauce, etc.

Nos encontramos, pues, ante una vegetación similar a la que actualmente cubre la zona, y que

habría que situar a partir del período Atlántico, que puede estar representado en la parte inferior del diagrama, hasta la transición del Subboreal al Subatlántico manifiesta en el resto del perfil espora-polinico.

COMPARACION DE LOS RESULTADOS CON LOS DE CONTEXTOS PROXIMOS

Seguendo el esquema de Rivas Martínez de 1987, según criterios fitosociológicos en base a la vegetación actual, la Cueva del Moro quedaria englobada en la región mediterránea. La parte nordoriental de ésta tiene realizados diferentes estudios polínicos que abarcan secuencias desde el Tardiglaciario, como es el caso de Pla de Llac, en la región de Olot, con dataciones desde 12300 B.P. (PEREZ OBIOL, 1987, 1988), el del depósito de Llauset, en los Pirineos centrales (Huesca) (MONTERRAT y VILAPLANA, 1987). Podemos hacer referencia, por último, por acotar la zona de secuencias próximas, al depósito de Búbal en la vertiente sur de los Pirineos (MONTERRAT, 1989). En todos los casos, se localiza un período con *Artemisia*, *Poaceae* y *Chenopodiaceae*. En esta fase Tardiglaciario se produce la instalación de árboles pioneros como *Juniperus*, *Betula* y *Pinus*.

El inicio del Postglaciario cuenta con más datos, tanto en depósitos orgánicos como arqueológicos. Tenemos los resultados obtenidos en Baños de Tredos, situado a 1.750 metros, en el Pirineo central (Lérida) (BARTLEY, 1962, y VILAPLANA y otros, 1989). También en los Pirineos centrales, la turbera de Formigal de Tena, publicada por Martí Bono y Menéndez Amor en 1977, Pla de Llacs, ya mencionada anteriormente, y que continúa su secuencia durante el Holoceno, o de nuevo la de Búbal, con niveles del inicio del Holoceno. He señalado ya que nos centramos en estos depósitos por ser los más próximos al yacimiento ahora estudiado, dejando los de la zona más oriental y occidental de los Pirineos.

Caracteres comunes a todos estos sería el desarrollo de la curva de *Quercus* y el aumento de la de *Corylus* en el inicio del Atlántico, estando acompañados de *Ulmus*, *Tilia*, *Abies*, este último con apariciones continuas desde el 7434 B.P. en la parte más oriental (PEREZ OBIOL, 1988), coincidiendo posteriormente su retroceso con la

presencia de *Fagus*, situada ya en el Subboreal. Este desarrollo es paralelo al que puede localizarse en la otra vertiente pirenaica, donde *Quercus* es el primer táxon mesófilo, seguido por *Corylus*, *Abies*, éste hacia 7000 B.P., *Ulmus*, *Tilia* y *Fraxinus* (PEÑALBA, 1989).

En cuanto a sedimentos arqueológicos en el área próxima a la estudiada, podemos señalar el yacimiento de Abauntz, situado sobre un barranco por el que corre el arroyo de Zaldazain, poco antes de su desembocadura en el Ulzama, en Navarra (LOPEZ GARCIA, 1987). A pesar de la escasez de táxones, abordamos un intento de interpretación de una secuencia que comenzaba en el Pleistoceno, acabando en el Atlántico, con fechas de C14 situadas entre el 15800 ± 350 B.P. al 4240 ± 140 B.P., y donde en las primeras fases *Pinus* es el árbol dominante, sustituido en el inicio del Holoceno por *Corylus*, acompañado de *Alnus*, *Tilia*, *Betula* y *Quercus*. Datos similares pueden encontrarse en el yacimiento de La Peña, situado también en Navarra, en la localidad de Marañón, con una secuencia holocena completa, y con un porcentaje arbóreo superior al 50 %, dominado por *Corylus*, alternando con *Pinus* y *Quercetum mixtum*. La presencia de *Tilia* es patente a partir de la mitad de la secuencia, pudiendo ser interpretada como encuadrable en el Atlántico, acompañado de un aumento de *Corylus*, que había descendido, y una buena representación de *Ulmus*. Como en el caso de la Cueva del Moro, son importantes los valores de *Hedera* y de táxones mediterráneos.

Para finalizar, tenemos que señalar que, en general, los sedimentos arqueológicos peninsulares de la zona mediterránea, y desde inicios del Holoceno, están muy influenciados por la actividad humana. La dinámica de la vegetación implica, fundamentalmente, a tres táxones: *Betula*, *Quercus* y *Pinus*, interviniendo en la zona este *Corylus* y *Tilia*. Como resumen, podemos señalar que las variaciones existentes entre los resultados de las turberas y los depósitos arqueológicos vienen dadas por la situación de unas y otros, las primeras alejadas y poco influidas por la presencia del hombre. La ausencia, casi total, de *Abies* y *Carpinus* en la Península Ibérica, es considerada por Peñalba (1989) como una consecuencia de la actividad destructiva del hombre, datada por Jalut entre el 5000 y el 4000 B.P. (JALUT, 1984), en la vertiente norte de los Pirineos.

REFERENCIAS

- ARROYO, B. (1988): *Páramos y estepas*. Enciclopedia de la Naturaleza de España, 1. Debate/Círculo.
- BARTLEY, D (1962): *Pollen analysis of a small peat deposit at Baños de Tredos, near Viella in the Central Pyrenees*. Pollen et Spores, 4 (1): 105-108.
- BRAUN-BLANQUET, J., y O. DE BOLOS, (1987): *Las comunidades de la Depresión del Ebro y su dinamismo*. Delegación de Medio Ambiente. Ayuntamiento de Zaragoza.
- FERNANDEZ GONZALEZ, F. (1986): *Los bosques mediterráneos*. Ed. MOPU. Madrid.
- GOEURI, C. L., y BEAULIEU, J. L. (1979): *A propos de la concentration du pollen a l'aide de la liqueur de Thoulet dans les sédiments minéraux*. Pollen et Spores, 23 (1-2): 239-251.
- JALUT, G. (1984): *L'action de l'homme sur la forêt montagnarde des Pyrénées ariégeoises et orientales depuis 4000 BP d'après l'analyse pollinique*. Actes du 106e Congrès National des Sociétés Savantes. Perpignan, 1981: 163-172.
- IZCO, J. (1984): *Madrid verde*. MAPA-C.A.M. Madrid.
- LOPEZ GARCIA, P. (1978): *Resultados polínicos del Holoceno en la Península Ibérica*. Trabajos de Prehistoria, 35: 9-44.
- LOPEZ GARCIA, P. (1984): *Aplicaciones de la Palinología a la Prehistoria: métodos utilizados y resultados*. Actas Primeras Jornadas de Metodología de Investigación Prehistórica, 309-317. Soria, 1981.
- LOPEZ GARCIA, P. (1986): *Estudio Palinológico del Holoceno español a través del análisis de yacimientos arqueológicos*. Trabajos de Prehistoria, 43: 143-158.
- LOPEZ GARCIA, P. (1987): *Datos polínicos del Holoceno de Navarra y Aragón*. Actas del VI Simposio de Palinología. APLE. Salamanca, 1986: 315-320.
- MARTI BONO, C., y MENENDEZ-AMOR, J. (1977): *Análisis polínico de una turbera postglaciario en el valle del alto*

Gállego (Aragón). II Congreso Nacional del Cuaternario. Jaca, 1975: 157-165.

MONTERRAT, J. (1989): *La haute vallée du Gallego*. En Hubschman, J. y Jalut, G. (ed). Glaciaire pyrénéen versant nord et versant sud. Livret guide excursion A.F.E.Q.: 31-33.

MONTERRAT, J., y VILAPLANA, J. M. (1987): *The paleoclimatic records of the upper Pleistocene and Holocene in the Llauset valley (central Pyrenees)*. Pirineos, 129: 107-113.

PEINADO, M., y RIVAS MARTINEZ, S. (1987): *La vegetación de España*. Universidad de Alcalá de Henares. Madrid.

PEÑALBA, C. (1989): *Dynamique de vegetation tardiglaciaire et Holocene du Centre-Nord de l'Espagne d'après l'analyse pollinique*. These de l'Université d'Aix-Marseille III.

PEREZ OBIOL, R. (1987): *Evolucio del paisatge vegetal quaternari a les zones d'Olot i Sils*. Tesis doctoral de la Universidad Autónoma de Barcelona (microfichas).

PEREZ OBIOL, R. (1988): *Histoire tardiglaciaire et holocene de la végétation de la région volcanique d'Olot (N.E. Péninsule Ibérique)*. Pollen et spores, 30 (2): 189-202.

RIVAS MARTINEZ, S. (1987): *Introducción. Nociones sobre Fitosociología, Biogeografía y Bioclimatología*. En: La vegetación en España. Eds.: M. Peinado Lorca y S. Rivas-Martínez: 17-45.

RIVAS MARTINEZ, S. (1987): *Memoria del MAPA de Series de vegetación en España*. ICONA-MAPA. Madrid.

UTRILLA, P.; RODANES, J. M., y REY, J. (1993): *Ocupación de la Cueva del Moro de Olvena (Huesca) durante el Bronce final*. Homenaje a Manuel Pellicer: 563-591.

VILAPANA, J. M., y MONTERRAT, J. (1989): *Recent progress in Quaternary stratigraphy: The lake Llauset sequence in the Spanish Pyrenees*. En: Rose and Schlüchter (eds). Quaternary Type Sections: Imagination or Reality?: 113-124.

Original recibido: Febrero de 1994.

Original aceptado: Mayo de 1994.

MINERIA

Aproximación geológica a las minas neolíticas de fosfatos férrico-alumínicos de Gavà (Catalunya).

Por F. COSTA (*) A. CAMPRUBI (*), y J. C. MELGAREJO (*)

RESUMEN

El complejo minero de Gavà (Catalunya) fue explotado desde el 3400 a.C. hasta cerca de 1000 después (Neolítico), lo que lo convierte en las minas en galería más antiguas de Europa, encontradas hasta el momento. Se ha llevado a cabo la cartografía geológica de las minas para determinar el motivo de explotación, el modo como se hicieron las minas y los criterios que se usaron para ello.

La geología del complejo consiste en materiales del Llandoveryense cubiertos de manera discordante por caliches del Cuaternario de hasta 3 m de potencia. La serie silúrica consiste de limolitas grises con niveles y grandes nódulos de chert, niveles monominerálicos y masivos de hematites, de jarosita y de fosfatos Fe-Al. Dichos materiales son atravesados por vetas post-hercínicas de variscita, turquesa, strengita y jarosita.

Muchas de las galerías y pozos de mina siguen vetas o niveles de fosfatos. Otras galerías y cámaras de las minas principales fueron excavadas en fracturas (fallas y cabalgamientos), por las facilidades de excavación que suponen, para obtener nuevos recursos sin tener que abrir una nueva mina. Ninguna de las galerías ni los pozos se excavaron siguiendo chert o los niveles de hematites, de lo que se deduce que el objetivo de las minas era solamente variscita y otros fosfatos similares (usados en ornamentación). Otro aspecto significativo que se desprende de la cartografía geológica es que muchos de los pozos de acceso a las minas fueron abiertos en los caliches cuaternarios, por lo que los mineros del Neolítico tuvieron conocimiento del concepto de discordancia, aunque sólo a un nivel empírico.

Palabras clave: Neolítico, Fosfatos, Variscita, Mina, Silúrico, Gavà, Catalunya.

ABSTRACT

The mining complex of Gavà (Catalonia), which are the oldest underground mines found until the meantime in Europe, was worked since 5400 b.p. until nearly 1000 years after (Neolithic). Geological mapping and detailed mineralogical study was performed in order to state the aim of exploitation, the way the mines were done and which criteria were used to do so.

The geology of this complex consists of Llandoveryan materials unconformably covered by up to 3 m of Quaternary calcretes. The Silurian series consist of grey shales with chert layers and nodules, monomineralic hematite, jarosite and Al-Fe phosphate layers. Post-Hercynian veins filled up by variscite, turquoise, strengite and jarosite cut across the Silurian materials.

Many of the galleries and pits run along phosphate veins or layers. Other galleries and chambers were done making use of the easy removal of materials affected by fracturing (thrusts and faults) as a way to get new resources without opening new mines. Neither galleries nor pits are made along chert or iron oxides. Hence, the aim of exploitation were variscite and other similar phosphates for ornamentation. Inferred from the geological mapping is the evidence that most of the pits of access to the mines were opened on Quaternary calcrete. This means that they realized about the unconformity concept, but only in a practical way.

Key words: Neolithic, Phosphate, Variscite, Mine, Silurian, Gavà, Catalonia.

(*) Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals. Universitat de Barcelona. Carrer de Martí i Franquès, s/n. 08028 Barcelona.

INTRODUCCION

En la población de Gavà (a 20 km al sur de Barcelona, fig. 1) se descubrió durante los años 70 un extenso complejo minero de pozos y galerías, la longitud de las cuales se ha estimado en más de 400 m, aunque su excavación arqueológica todavía no ha terminado. Este complejo, de acuerdo con las conclusiones de ALONSO et al. (1978) y VILLALBA et al. (1990), fue activo durante el Neolítico medio (desde 3400 años a.C. hasta cerca de un milenio después). Por tanto, constituyen las explotaciones mineras en galería más antiguas de Europa (las primeras explotaciones corresponden al Neolítico antiguo postcardial) conocidas hasta el momento, comparadas con otras de edad similar (FAUL y FAUL, 1983). Según los datos de VILLALBA et al. (1987) y VILLALBA et al. (1989), los motivos de explotación eran chert, ocre y *calaitas*, aunque esta cuestión ha suscitado controversia entre los arqueólogos (por ejemplo, FERNANDEZ TURIEL et al., 1990; BOSCH et al., 1993). El término genérico

de *calaita* engloba a los fosfatos férrico-alumínicos similares a la turquesa (fundamentalmente variscita, $AlPO_4 \cdot 2H_2O$, aunque también strengita, $FePO_4 \cdot 2H_2O$, y otros) utilizados durante el Neolítico para manufacturar ornamentos.

Un primer objetivo de este trabajo es, pues, tratar de determinar cuáles fueron los recursos explotados. Ello sólo puede establecerse a partir de una cartografía geológica de las galerías, a fin de ver qué unidades geológicas siguen estas galerías. Pero, adicionalmente, la disposición de las galerías puede revelar datos acerca de cómo plantearon los mineros del Neolítico la explotación en relación a otras estructuras y, por lo tanto, permite una aproximación (hasta ahora no planteada) a los conocimientos de Geología en esa época.

El complejo minero abarca unas 60 minas localizadas hasta el momento, aunque muchas otras deben estar cubiertas por zonas edificadas durante los años 60 y 70. El grado de reconocimiento de las que están localizadas es bastante

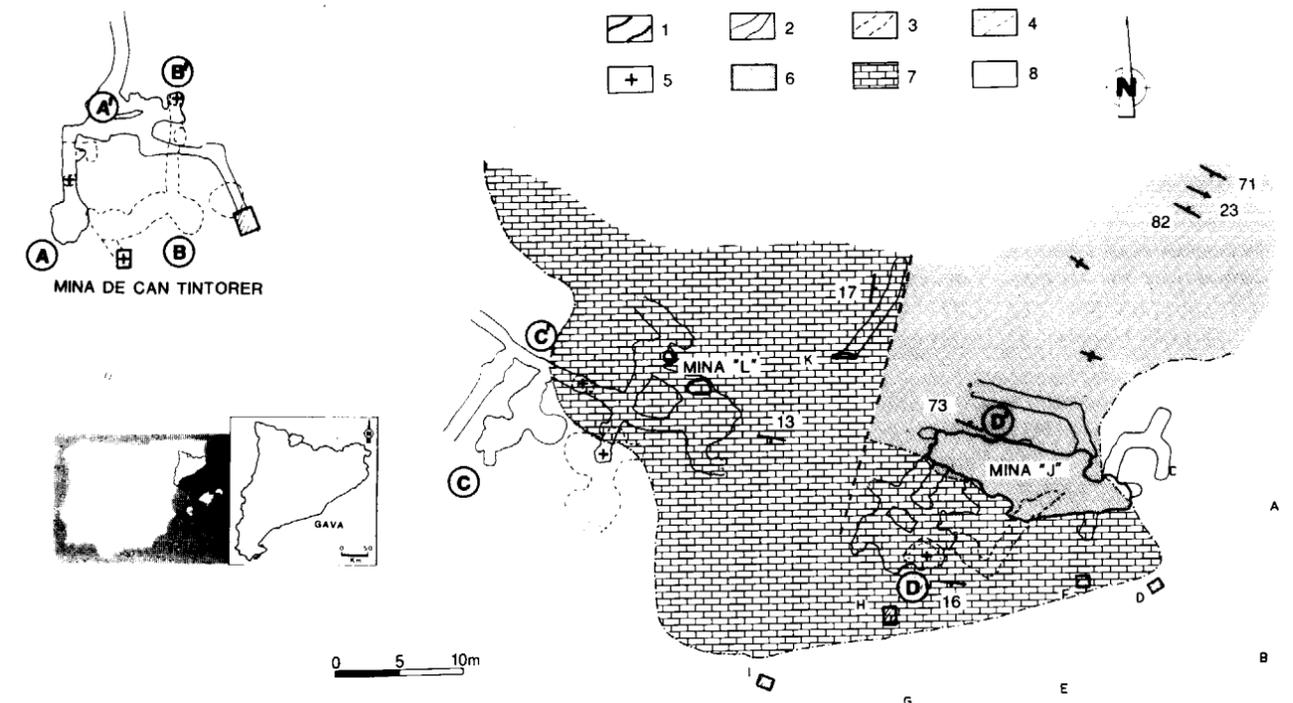


Figura 1.—Mapa geológico de superficie de la zona de Can Tintorer en Gavà, mostrando el trazado de las minas en profundidad. 1) Contorno de labores aflorando en superficie; 2) contorno del primer nivel; 3) contorno del segundo nivel; 4) contorno del tercer nivel; 5) pozo; 6) pizarras grises (Llandoveryense); 7) caliches (Cuaternario); 8) derrubios cuaternarios. Las letras indican ubicación de minas no excavadas o en proceso de excavación.

diverso: en algunos casos las minas han sido completamente excavadas, presentando dimensiones comprendidas desde pocos metros hasta casi el centenar de metros; otras están en proceso de excavación y de otras por el momento sólo se conoce el acceso. Por tanto se han seleccionado para este estudio tres de las minas con estado de excavación más avanzado o ya completado, de mayor longitud y que exhiben galerías a diversos niveles comunicadas mediante pozos. Se trata de tres minas situadas dentro del pueblo de Gavà: una bajo la antigua masía de Can Tintorer y otras dos en un solar situado al E de la masía, las denominadas *J* y *L* (fig. 1).

GEOLOGIA

La geología de la zona seleccionada está constituida por materiales del Silúrico Inferior: pizarras grises con chert (en niveles de potencia variable que pueden hallarse *slumpizados*, o en nódulos que alcanzan varios decímetros de diámetro), niveles masivos de óxidos de hierro (fundamentalmente hematites), niveles con nódulos monominerálicos de nontronita ($\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), niveles de jarosita masiva y niveles de fosfatos férrico-alumínicos y apatito (CAMPRUBI et al., 1993; COSTA et al., 1993).

Los procesos de removilización de las mineralizaciones estratiformes (especialmente las de fosfatos) han sido activos anterior, contemporáneamente y con posterioridad a la deformación hercínica y han resultado en la formación de mineralización en filones. De estas mineralizaciones filonianas las más importantes en volumen son las post-hercínicas (post-esquistosas), constituidas por variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), strengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), turquesa ($\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), crandallita ($\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y jarosita ($\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) que siguen con preferencia la dirección SSO-NNE.

Todos los materiales anteriormente citados están cubiertos discordantemente por caliches y arcillas de edad Cuaternaria (de hasta 3 m de potencia) y materiales de derrubio cuaternarios (figs. 1 y 2).

LA MINA DE CAN TINTORER

Se trata de una de las minas más ampliamente



Figura 2.—Foto de la parte superior de la mina *J* que muestra la discordancia entre las pizarras con fosfatos del Silúrico y los caliches y arcillas del Cuaternario.

excavadas en el complejo. La estructura geológica que atraviesa es sumamente compleja: los materiales de edad Silúrica se hallan muy afectados por la deformación hercínica, con al menos dos generaciones de pliegues de ejes parecidos (aprox. NO-SE) pero opuesta vergencia, a los que se superponen diversos cabalgamientos hercínicos, *kink-bands* y fallas de edades diversas. Como ocurre en todo el complejo minero, se han reconocido dos tipos fundamentales de mineralizaciones de fosfatos: estratiforme (constituida por niveles monominerálicos de strengita, variscita y apatito) y en vetas (con variscita como mineral más significativo, pero también con strengita y fosfosiderita, a los que se asocian alunita y jarosita).

Asimismo, también cabe destacar la presencia de niveles con grandes nódulos de chert (ópalo) y de niveles monominerálicos de hematites. Estos dos tipos de material se tuvieron en cuenta en el momento de plantearse cuáles pudieron ser los objetivos principales de la explotación, puesto que el chert se habría podido explotar para la manufactura de herramientas y los óxidos de hierro como ocre para pigmentos.

La mina consta de dos plantas comunicadas por pozos o cámaras. La galería principal de la primera planta (fig. 3), a la que se accede por pozos o rampas, sigue principalmente una superficie de cabalgamiento. A partir de esta galería se practicaron diversas catas sobre filones de varis-

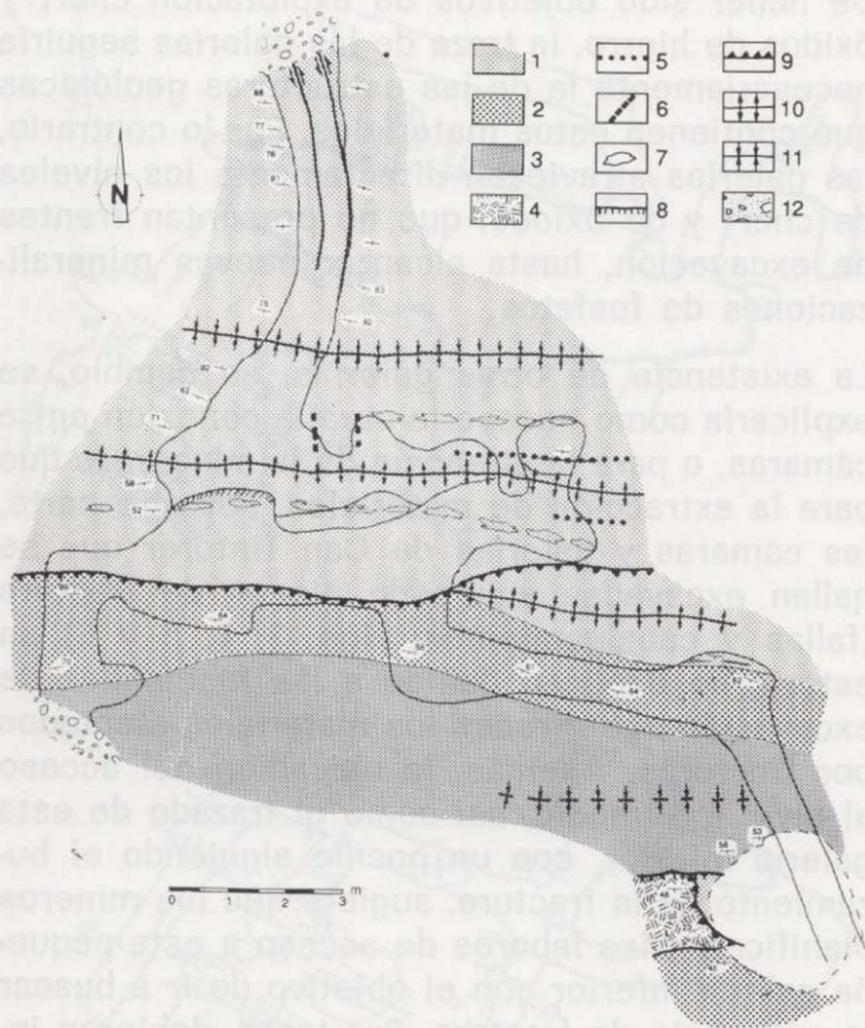


Figura 3.—Cartografía geológica de la primera planta de la mina de Can Tintorer, en que se muestra que las fracturas principales rigen la traza de las cámaras principales y los niveles y vetas de fosfatos la de algunas galerías y el pozo que comunica con la planta inferior. Leyenda: 1) Pizarras grises con nódulos de chert y niveles de fosfatos; 2) Pizarras marrones y verdosas interestratificadas con niveles de hematites; 3) Pizarras marrones; 4) Strengita interestratificada con pizarras grises; 5) Niveles de variscita; 6) Vetas de variscita y strengita; 7) Nódulos de chert; 8) Fallas; 9) Cabalgamientos; 10) Anticlinal; 11) Sinclinal; 12) Derrubios.

cita de dirección N-S, así como dos pozos: uno da acceso a una corta galería en profundidad intermedia entre las plantas principales que va a buscar el cabalgamiento y lo sigue durante un corto trecho (fig. 4); el otro comunica con la segunda planta. Este pozo fue excavado siguiendo un nivel estratiforme de variscita, identificado en otros puntos de la galería. Los primeros metros de la segunda planta atraviesan repetidamente a los niveles de chert y de óxidos sin desarrollar en ellos galerías o cámaras de explotación. Aunque en la figura 5 se aprecia un inicio de pozo en un tramo con chert, en asociación al mismo hay también un pequeño nivel de variscita, por lo que no es en absoluto claro que dicho

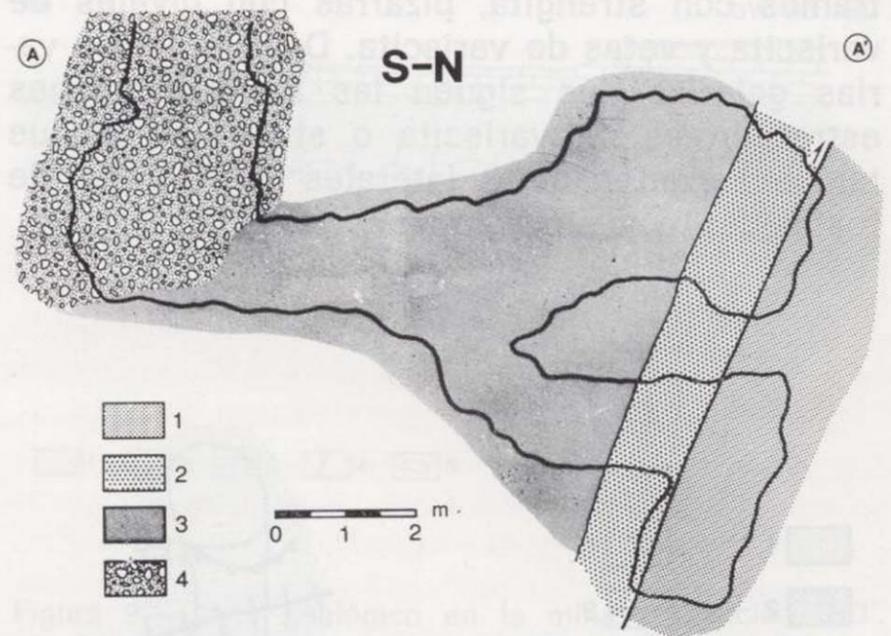


Figura 4.—Corte geológico de la mina de Can Tintorer según A-A'. Nótese el trazado de galerías a diferentes profundidades siguiendo el cabalgamiento principal. Leyenda: 1) Pizarras grises; 2) Pizarras verdes y marrones con niveles de hematites; 3) Pizarras marrones; 4) Derrubios.

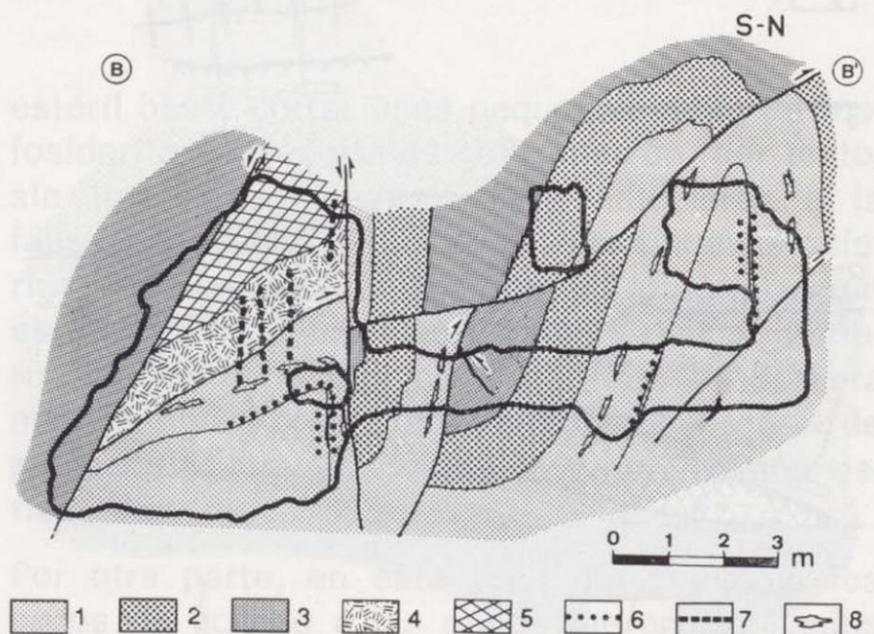


Figura 5.—Corte geológico de la mina de Can Tintorer según B-B' (ver situación del corte en fig. 1). Nótese: acceso a la segunda planta por el pozo siguiendo un nivel de variscita; galería de exploración cortando niveles con chert u óxidos; desarrollo de cámaras y galerías laterales sobre áreas con mineralización estratiforme o en vetas. Leyenda: 1) Pizarras grises con nódulos de chert y niveles de fosfatos; 2) Pizarras marrones y verdosas interestratificadas con niveles de hematites; 3) Pizarras marrones; 4) Strengita interestratificada con pizarras grises; 5) Niveles de jarosita interestratificados con pizarras marrones; 6) Niveles de variscita; 7) Vetas de variscita y strengita; 8) Nódulos de chert.

socavón se deba a la explotación de chert. Esta galería desemboca en una cámara excavada en

tramos con strengita, pizarras con niveles de variscita y vetas de variscita. De ella parten varias galerías que siguen las mineralizaciones estratiformes de variscita o strengita, aunque también existen catas laterales sobre vetas de fosfosiderita y strengita (fig. 6).

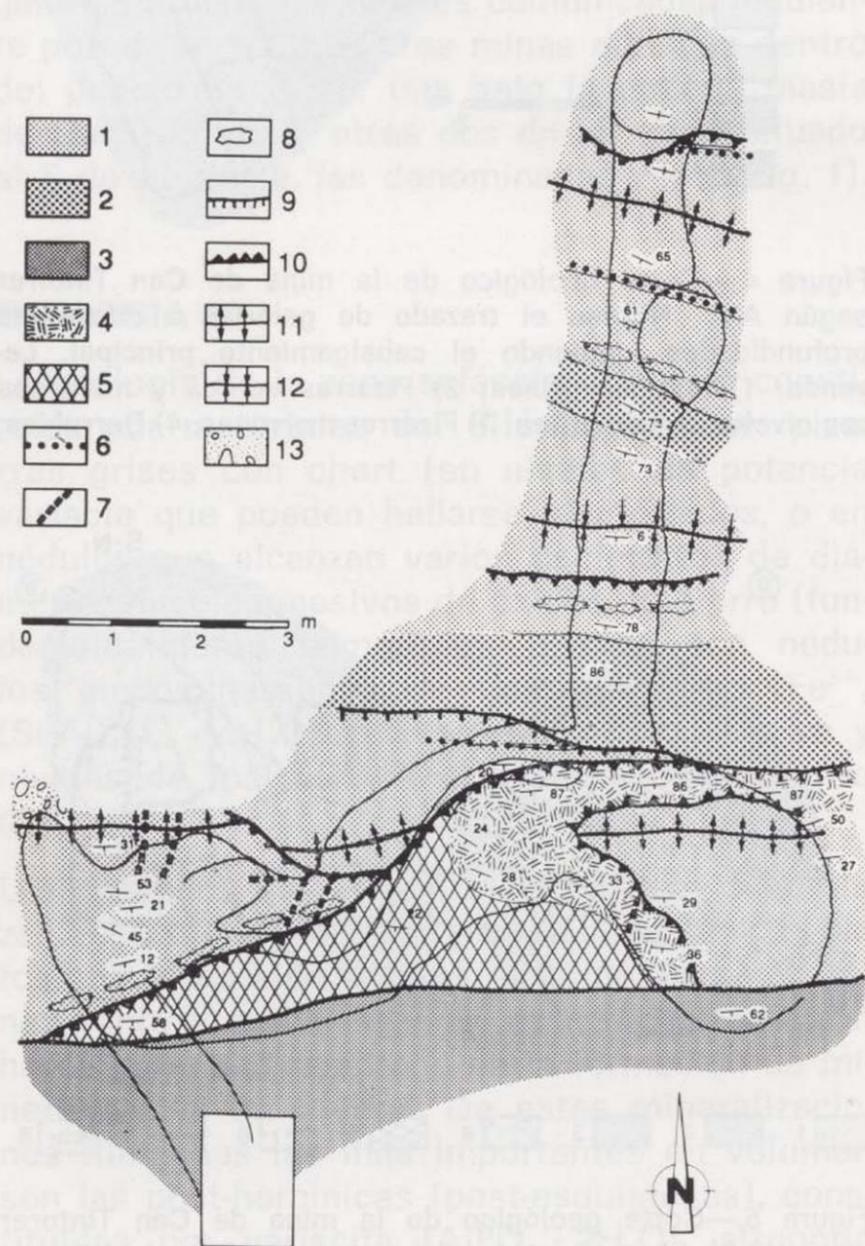


Figura 6.—Cartografía geológica del nivel inferior de la mina de Can Tintorer. Nótese: galería de exploración atravesando niveles de chert y óxidos de Fe, cámara excavada en un potente tramo de strengita y vetas y niveles de variscita; las fracturas principales también controlan la traza de las cámaras principales; los niveles y vetas de fosfatos determinan el trazado del resto de galerías y frentes de explotación locales. Leyenda: 1) Pizarras grises con nódulos de chert y niveles de fosfatos; 2) Pizarras marrones y verdosas interestratificadas con niveles de hematites; 3) Pizarras marrones; 4) Strengita interestratificada con pizarras grises; 5) Niveles de jarosita interestratificados con pizarras marrones; 6) Niveles de variscita; 7) Vetas de variscita y strengita; 8) Nódulos de chert; 9) Fallas; 10) Cabalgamientos; 11) Anticlinal; 12) Sinclinal; 13) Derrubios.

De haber sido objetivos de explotación chert y óxidos de hierro, la traza de las galerías seguiría necesariamente la de las estructuras geológicas que contienen estos materiales. Por lo contrario, las galerías atraviesan directamente los niveles de chert y de óxidos, que no presentan frentes de excavación, hasta alcanzar nuevas mineralizaciones de fosfatos.

La existencia de otras galerías, en cambio, se explicaría como necesaria para la conexión entre cámaras, o para la aireación de la mina, más que para la extracción de materiales. Por otra parte, las cámaras y galerías de Can Tintorer que se hallan excavadas siguiendo planos de fractura (fallas y cabalgamientos; figs. 3, 4, 5 y 6) en estéril, se explican debido a las facilidades de excavación que ofrecen los materiales afectados por fracturas. Además, la ubicación del acceso al nivel intermedio, así como el trazado de esta galería inferior, con un pocillo siguiendo el buzamiento de la fractura, sugiere que los mineros planificaron las labores de acceso a esta pequeña galería inferior con el objetivo de ir a buscar la superficie de fractura. Por tanto, debieron interpretar relaciones tridimensionales de aquellas estructuras que les eran favorables.

MINAS J y L

En estas minas la estructura geológica es más sencilla: aunque se aprecian pliegues muy cerrados y de charnela muy aguda, el resultado es la repetición de los niveles de fosfatos, que toman buzamientos subverticales. Este hecho conlleva que la interpretación de los métodos de explotación sea también más sencilla. Así, prácticamente todas las cámaras y galerías de las minas se han hecho siguiendo directamente niveles estratiformes de fosfatos, normalmente variscita, y vetas con strengita, variscita, fosfosiderita o jarosita (mineral sin interés ornamental) (figs. 7, 8 y 9). Puesto que la dirección de las capas de fosfatos es 120 y la de vetas es 030, se explican las direcciones sistemáticas de las galerías. A la vez, esta distribución permitía que durante su explotación se dejaran pilares en previsión de posibles derrumbes (figs. 7, 8 y 9).

La galería principal de la mina L, no obstante, sigue una falla posiblemente direccional, con dirección NO-SE (fig. 7). Esta galería discurre por

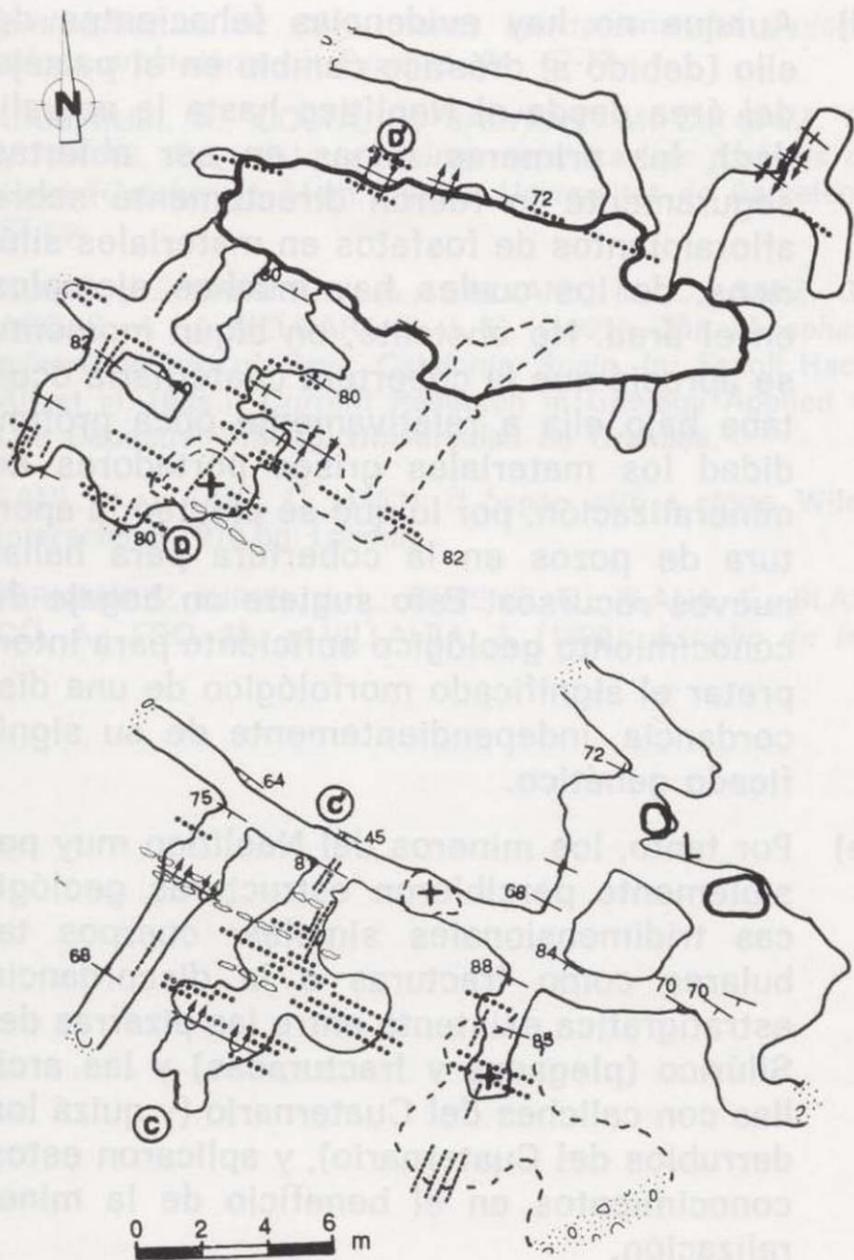


Figura 7.—Mapa de las minas J (arriba) y L (abajo) con la situación de los niveles y vetas de fosfatos. Nótese la concordancia de la traza de los mismos y de las galerías. Leyenda como en fig. 6.

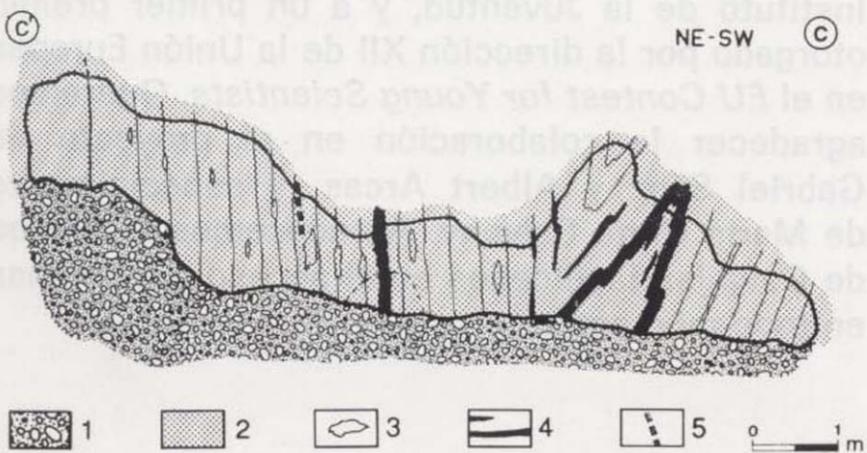


Figura 8.—Corte geológico en la mina L (según C-C', ver fig. 1) con la explotación de niveles (en la galería perpendicular al corte) y vetas (en la galería del corte) de fosfatos. Leyenda: 1) Derrubios de relleno de la mina; 2) Pizarras grises; 3) Nódulos de Chert; 4) Niveles con variscita-strengita; 5) Vetas de variscita-strengita.

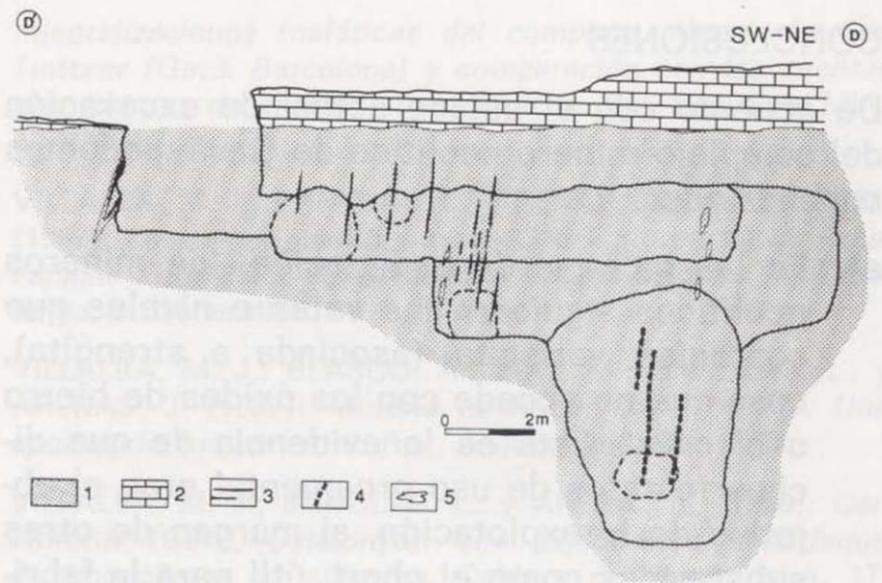


Figura 9.—Corte geológico en la mina J (sección D-D', ver fig. 1) que muestra la discordancia entre el Silúrico y el Cuaternario y el desarrollo de la mina en función de dicha discordancia y de la disponibilidad de fosfatos. Leyenda: 1) Pizarras grises; 2) Arcillas y caliches del Cuaternario; 3) Niveles de variscita; 4) Vetas de variscita; 5) Nódulos de chert.

estéril hasta cortar unas pequeñas vetas de fosfoderita y strengita de color marrón (por tanto, sin interés ornamental), perpendiculares a la falla. Sobre estas vetas se trazaron nuevas galerías, que a su vez cortaron la mineralización estratiforme de fosfatos, sobre la que se abrieron nuevas galerías y cámaras (figs. 7 y 8). Esta mina también presenta un pozo de unos 5 m de profundidad practicado sobre mineralización estratiforme de variscita.

Por otra parte, en esta zona del complejo los pozos de acceso a las minas fueron excavados en los materiales cuaternarios, que recubren discordantemente los materiales silúricos (figs. 1, 2 y 9). Este es un hecho importante que hay que tener en cuenta en el momento de interpretar cuáles pudieron ser los conocimientos geológicos durante el Neolítico.

Hasta el momento, estas minas no se encuentran excavadas en toda su extensión, pero en el estado actual se llega hasta un tercer nivel de galerías de explotación (en la mina J), a una profundidad de hasta 10 m bajo el nivel de superficie del solar actual (teniendo en cuenta que se trata de una superficie en que la cobertera cuaternaria ha sido sensiblemente rebajada), hecho que puede dar una idea de la extensión e importancia de la minería en este área.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el estado actual de excavación del complejo minero neolítico de Gavà, podemos concluir que:

- a) En las galerías de explotación, los mineros neolíticos siguieron las vetas o niveles que contenían variscita (asociada a strengita), cosa que no sucede con los óxidos de hierro o el chert. Esta es la evidencia de que dichos fosfatos de uso ornamental eran el objetivo de la explotación, al margen de otras substancias como el chert, útil para la fabricación de herramientas, o como los óxidos, aspecto que debe tenerse en cuenta en las interpretaciones socio-económicas del Neolítico.
- b) Algunas galerías fueron abiertas siguiendo vetas de fosfatos o sulfatos (jarosita) sin interés ornamental principal. Por tanto, es posible que los mineros del Neolítico entendieran hasta cierto punto que ciertos minerales estaban asociados en la misma estructura y que ello podía ser utilizado como criterio de exploración.
- c) Muchas galerías siguen fracturas tales como cabalgamientos o fallas. Estas labores se habrían llevado a cabo en base a tres posibles objetivos. En primer lugar, para conseguir nuevos recursos de fosfatos del modo más fácil posible en una explotación en marcha, puesto que la excavación en los materiales fracturados exigiría un coste de trabajo inferior aun al de la propia explotación sobre mineralización. En segundo lugar, para atender a la necesidad de la propia explotación de disponer de cámaras amplias en el interior de la mina. Finalmente, para no tener que abrir nuevos pozos en la cobertera cuaternaria, trabajo que era más costoso. En efecto, la cobertera está constituida generalmente por más de 1 m de potencia de roca compacta y con pocas discontinuidades que faciliten su excavación por medios rudimentarios, y cabe pensar que durante el Neolítico era más gruesa (el nivel de superficie actual se encuentra rebajado debido a obras recientes). Además, la cobertera es estéril y oculta las mineralizaciones, por lo que un nuevo pozo suponía un riesgo de no encontrar el tramo mineralizado.
- d) Aunque no hay evidencias fehacientes de ello (debido al drástico cambio en el paisaje del área desde el Neolítico hasta la actualidad), las primeras minas en ser abiertas seguramente lo fueron directamente sobre afloramientos de fosfatos en materiales silúricos, de los cuales hay muchos ejemplos en el área. No obstante, en algún momento se apreció que la cobertera cuaternaria ocultaba bajo ella a relativamente poca profundidad los materiales grises portadores de mineralización, por lo que se planteó la apertura de pozos en la cobertera para hallar nuevos recursos. Esto sugiere un bagaje de conocimiento geológico suficiente para interpretar el significado morfológico de una discordancia, independientemente de su significado genético.
- e) Por tanto, los mineros del Neolítico muy posiblemente percibieron estructuras geológicas tridimensionales simples: cuerpos tabulares como fracturas o la discordancia estratigráfica existente entre las pizarras del Silúrico (plegadas y fracturadas) y las arcillas con caliches del Cuaternario (y quizá los derrubios del Cuaternario), y aplicaron estos conocimientos en el beneficio de la mineralización.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado gracias a un primer premio en el Certamen Nacional de Jóvenes Investigadores de 1992, concedido por CICYT y el Instituto de la Juventud, y a un primer premio otorgado por la dirección XII de la Unión Europea en el *EU Contest for Young Scientists*. Queremos agradecer la colaboración en el proyecto de Gabriel Sáez y Albert Arcas, y especialmente de Maria Cinta Salvany. Agradecemos al Museu de Gavà las facilidades en el acceso a las minas en todo momento.

REFERENCIAS

- ALONSO, M.; EDO, M.; GORDO, L.; MILLAN, M., y VILLALBA, M. J. (1978): *Explotación minera neolítica en Can Tintoré (Gavà, Barcelona)*. Pyrenae, 13-14: 7-14.
- BOSCH, J.; CARRETE, J. M.; ESTRADA, A., y VERDAGUER, T. (1993): *El neolític antic evolucionat a les mines*

prehistòriques de Gavà: noves aportacions del projecte mines prehistòriques. Pyrenae, 24: 57-77.

CAMPRUBI, A.; COSTA, F.; SALVANY, M. C.; SAEZ, G., y ARCAS, A. (1993): *Las minas neolíticas de fosfatos de Gavà (Catalunya)*. Mem. Inédita Universitat de Barcelona. 63 pp.

COSTA, F.; CAMPRUBI, A.; SALVANY, M. C.; SAEZ, G.; ARCAS, A., y MELGAREJO, J. C. (1993): *The phosphate mineralizations of Gavà, Catalonia, Spain*. In: Fenoll Hach-Alí et al. (eds.): *Current Research in Geology Applied to Ore Deposits*, 715-718. Universidad de Granada.

FAUL, H., y FAUL, C. (1983): *It began with a stone*. Wiley interscience. 270 pp. London.

FERNANDEZ TURIEL, J. L.; GIMENO, D.; PLANA, F.; BLASCO, A.; EDO, M., y VILLALBA, J. (1990): *Estudio de las*

mineralizaciones fosfáticas del complejo minero de Can Tintorer (Gavà, Barcelona) y comparación con las cuentas procedentes de ajueres arqueológicos. Bol. Soc. Esp. Min., 13-1: 86-87.

VILLALBA, M. J.; BAÑOLAS, L.; ARENAS, J., y ALONSO, M. (1987): *Les mines neolítiques de Can Tintorer. Gavà. Excavacions 1978-1990*. Excavacions arqueològiques a Catalunya, 6. Generalitat de Catalunya.

VILLALBA, M. J.; BLASCO, A.; EDO, M.; BAÑOLAS, L., y ARENAS, J. (1989): *Minería neolítica: Can Tintorer. Una aportación fundamental*. Rev. Arqueología, 96: 13-24.

VILLALBA, M. J.; BAÑOLAS, L., y ARENAS, J. (1990): *Can Tintorer (Gavà, Catalunya): une exploitation néolithique de phosphates et silicates*. Cahiers du Quaternaire, 17. Le silex de sa genèse à l'outil. Actes Vème Coll. Int. sur le silex, 275-285.

Original recibido: Agosto de 1994.

Original aceptado: Septiembre de 1994.

MINERIA

Mineralizaciones de fosfatos férrico-alumínicos de Gavà (Catalunya): tipología.

Por A. CAMPRUBI (*), F. COSTA (*) y J. C. MELGAREJO (*)

RESUMEN

En el área de Gavà-Bruguers se encuentran representadas las tres principales tipologías de mineralizaciones de fosfatos férrico-alumínicos que se encuentran en las Cadenas Costeras Catalanas: estratiforme, diferentes generaciones de vetas y reemplazamiento de calizas. Los fosfatos estratiformes (apatito, variscita, strengita, fosfosiderita) se encuentran en pizarras alumínicas (Llandoveryense Inferior), asociadas a niveles de nontronita, hematites, chert y diseminaciones de sulfuros y minerales con Ba, TTRR y V. Se sugiere un origen sedimentario-exhalativo de estos depósitos. Las vetas de fosfatos, también en pizarras alumínicas, están asociadas a jarosita o alunita. Un primer tipo comprende vetas monominerálicas de strengita, variscita, fosfosiderita y turquesa. Las vetas tardías contienen fosfatos de Ca-Al (crandallita, montgomeryita). Las calizas silúrico-devónicas fueron ankeritizadas previamente a su reemplazamiento por masas de hidróxidos de hierro. En ellas se halla tinticita rellenando porosidad, en vetas y en bolsadas irregulares de nódulos. La formación de la tinticita es temprana y es reemplazada por calcioferrita. El conjunto es cortado por vetas de fosfatos cálcicos (calcioferrita, dufrenita, collinsita). Estos fosfatos epigenéticos fueron producidos por fluidos ácidos y oxidantes debidos a lixiviación de sulfuros contenidos en las pizarras silúricas. Por tanto, el quimismo de la asociación mineral (fosfatos de Al-Fe-Cu en las pizarras, y fosfatos de Ca-Fe en las masas de goethita) es derivado del de las rocas encajantes.

Palabras clave: Variscita, Strengita Turquesa, Crandallita, Tinticita, Calcioferrita, Dufrenita, Collinsita, Sedimentario-exhalativo, Veta, Llandoveryense, Reemplazamiento de calizas.

ABSTRACT

The three main types of Al-Fe phosphate mineralization in the Catalonian Coastal Ranges are well exposed in the Gavà-Bruguers area: stratiform, veins of several generations and limestone replacement. Stratiform phosphates (apatite, variscite, strengite, phosphosiderite) are hosted by Al-shales (Early Llandoveryan) associated to layers of nontronite, hematite, chert and disseminations of sulfides and Ba, V and REE-bearing minerals. A sedimentary-exhalative origin is suggested for them. Phosphate veins are associated to jarosite or alunite, hosted by Al-shales as well. A first type comprises monomineralic strengite, variscite, phosphosiderite and turquoise veins. Late veins display Ca-Al bearing phosphates (crandallite, montgomeryite). The Silurian-Devonian limestones were ankeritized, then replaced by iron hydroxides. There are occurrences of porosity-filling tinticite in vugs or veins and as nodules in irregular bodies. Tinticite was early formed and it is being replaced by calcioferrite. Late Ca-bearing phosphate veins (calcioferrite, dufrenite, collinsite) crosscut the ensemble. These epigenetic phosphates were produced by acidic and oxidizing fluids due to leaching of sulfides from the Silurian series. Hence, the chemistry of the mineral association (Al-Fe-Cu phosphates inside the shales, and Fe and Ca phosphates into the goethite groundmass that replaced limestones) is derived from that of the hosting rocks.

Key words: Variscite, Strengite, Turquoise, Crandallite, Tinticite, Calcioferrite, Montgomeryite, Dufrenite, Collinsite, Sedimentary-exhalative, Vein, Llandovery, limestone replacement.

INTRODUCCION

En los últimos años se han reconocido mineralizaciones de fosfatos alumínicos asociados a series de edad silúrica de las Cordilleras Costeras

Catalanas (fig. 1): Pineda de Mar, Montcada i Reixac, Gavà y Bruguers (MATA et al., 1983; FERNANDEZ TURIEL et al., 1990), Sta. Creu d'Olorda, Serra de Miramar (MELGAREJO, 1992; CAMPRUBI et al., 1993), a las que cabe añadir las que encajan en series de edad carbonífera, como las de Cornudella de Montsant o las de Torroja (MELGAREJO, 1987).

(*) Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals. Universitat de Barcelona. Carrer de Martí i Franquès s/n. 08028 Barcelona.

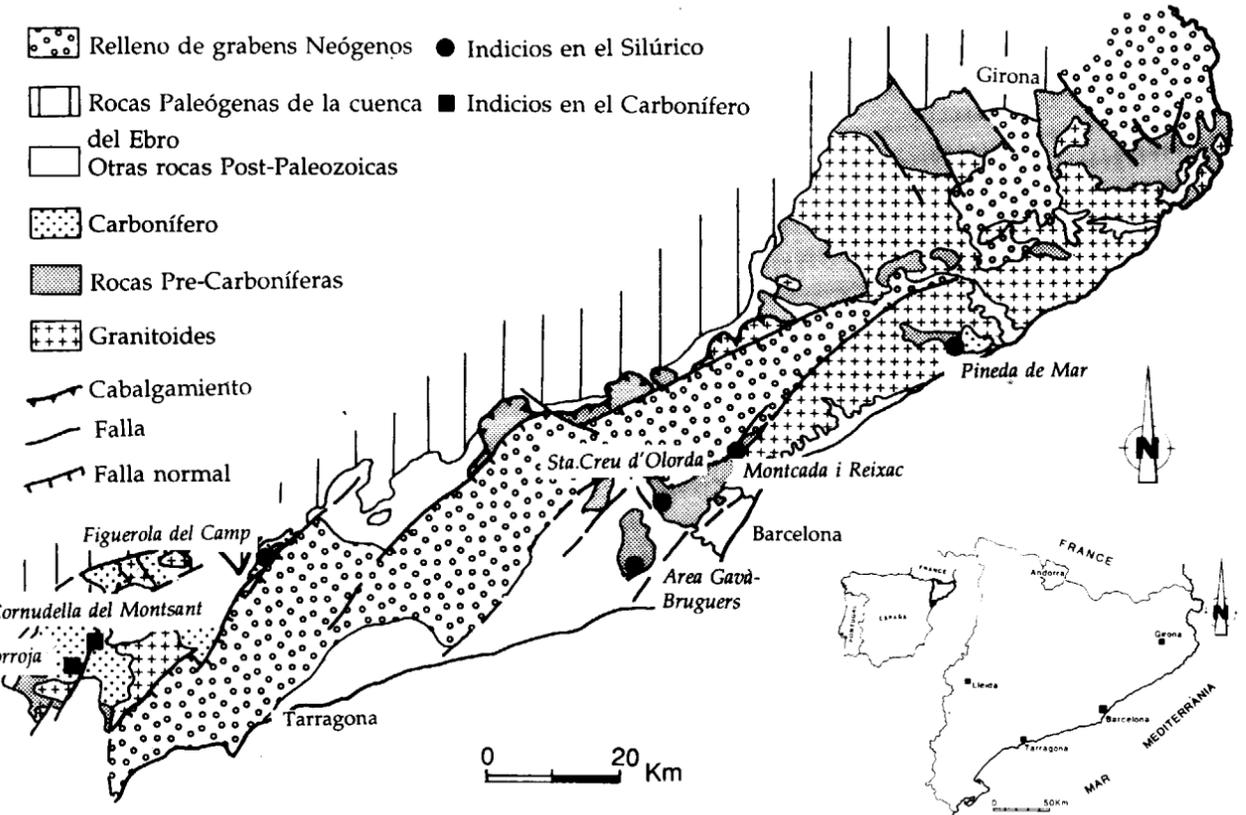


Figura 1.—Mapa geológico de las Cadenas Costeras Catalanas (modificado de JULIVERT y DURAN, 1990), con la situación de los principales afloramientos de fosfatos de Fe-Al-Cu en materiales del Paleozoico.

La zona de Gavà-Bruguers (20 km al SO de Barcelona) es la que presenta mayor variedad de depósitos con fosfatos (COSTA et al., 1993), a lo que se une al hecho de que algunos de ellos fueron explotados durante el Neolítico (circa 3500-2500 a.C., desde el Neolítico antiguo) en las minas en galería consideradas como las más antiguas de Europa (ALONSO et al., 1978; VILLALBA et al., 1990). Por todo ello puede tomarse este área como representativa. La distribución de los principales indicios minerales de este área se halla representada en la fig. 2.

Existen trabajos previos en que se analizan los minerales del área (MATA et al., 1983) o en los que se sugiere el origen de algunos de los mismos (FERNANDEZ TURIEL et al., 1990). El objetivo de este trabajo es ofrecer una visión de síntesis de los diversos tipos de mineralización, así como sus características petrográficas de detalle y una primera aproximación a las condiciones físico-químicas de formación de mineralización.

Metodología

Para el estudio de estas mineralizaciones se ha realizado la cartografía geológica del área de Gavà-Les Ferreres-Bruguers a escala 1:5.000, así como la de las galerías de mina generalmente a escala 1:100. En base a esta cartografía, en la que se han localizado las mineralizaciones, se ha realizado un muestreo de cada tipo de mineralización, obteniéndose láminas delgadas y secciones pulidas.

La identificación mineral se ha realizado de acuerdo con sus propiedades ópticas, a sus espectros de difracción de rayos X y a su composición química (cualitativa con SEM-EDS y cuantitativa con microsonda electrónica). Todos los análisis se realizaron en los Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona. Las condiciones analíticas de la microsonda fueron: instrumento CAMECA SX-50, 15 kev, magnificación 10.000 y 15 nA; standards: celestina (Sr, $L\alpha$), baritina (Ba, $L\alpha$), corindón (Al, $K\alpha$), ortosa

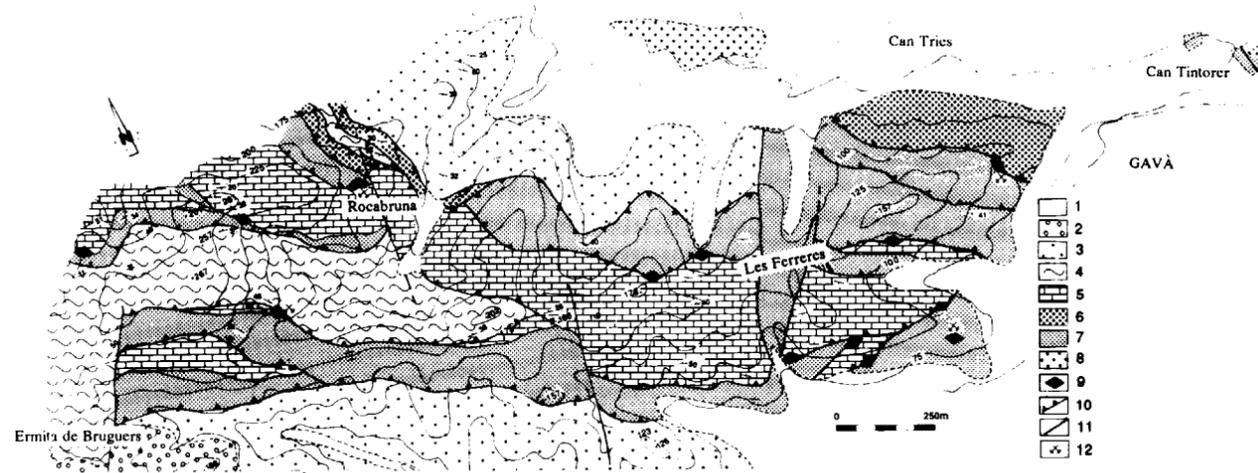


Figura 2.—Mapa geológico de la zona de Gavà-Les Ferreres-Bruguers. Nótese la disposición de las masas de óxidos de hierro. Leyenda: 1) cobertera cuaternaria; 2) conglomerados y areniscas en facies Buntsandstein; 3) pizarras y areniscas verdosas (Carbonífero); 4) margas y pizarras marrones (Devónico medio); 5) calizas y dolomías (Silúrico Superior-Devónico Inferior); 6) pizarras grises con chert (Llandovertense); 7) pizarras grises (Llandovertense); 8) pizarras, cuarcitas y grauvacas (Ordovícico Superior); 9) óxidos de hierro masivos; 10) cabalgamientos; 11) fallas; 12) minas inactivas.

(K, $K\alpha$), albita (Na, $K\alpha$), hematites (Fe, $K\alpha$), rodonita (Mn, $K\alpha$), rutilo (Ti, $K\alpha$), cuarzo (Si, $K\alpha$), wollastonita (Ca, $K\alpha$), esfalerita (Zn, $K\alpha$), periclasa (Mg, $K\alpha$), apatito (P, $K\alpha$), cobre (Cu, $K\alpha$). Los analistas fueron X. Llobet y J. García-Veigas.

El área de Gavà-Bruguers

Los depósitos se encuentran en series paleozoicas afectadas por la orogenia Hercínica. La serie paleozoica del área considerada comprende:

- tramos de pizarras, grauvacas y cuarcitas, atribuidos regionalmente al Ordovícico Superior o a la parte más baja del Llandovertense Inferior (JULIVERT et al., 1985; JULIVERT et al., 1987; JULIVERT et al., 1990);
- tramos de pizarras grises con graptolites, que intercalan pasadas de fosfatos y de nódulos o niveles de chert, atribuidos al Llandovertense Inferior en base a correlación de fitofacies con niveles datados en otros sectores (JULIVERT y DURAN, 1990; MELGAREJO, 1992);
- tramos de pizarras negras con graptolites y nódulos de pirita, sólo localizadas en galerías de mina, atribuidos regionalmente al Silúrico Medio (JULIVERT y DURAN, 1990);

- calizas y dolomías con ortoceras y crinoides, que comprenden el tránsito Silúrico Superior-Devónico Inferior por comparación con sectores próximos bien datados (GARCIA-LOPEZ et al., 1990);
- margas con tentaculites atribuidas al Devónico Medio (GARCIA LOPEZ et al., 1990), y
- pizarras verdosas y grauvacas con *Dictyodora*, atribuidas al Carbonífero Inferior (FERNANDEZ MARTOS, 1980). Sobre estos materiales se dispone de manera discordante la serie triásica en Facies Germánica. Cabe añadir que los tramos de pizarras con liditas de sectores muy próximos presentan intercalaciones de tobas básicas (FERNANDEZ MARTOS, 1980) o cuerpos interpretados como diabasas que manifiestan afinidad básica alcalina (GIL IBARGUCHI, et al., 1990), aunque en la zona estudiada no se han encontrado.

La deformación hercínica ha producido una estructuración compleja, con al menos dos grupos de pliegues coaxiales (de ejes aproximadamente NO-SE), con una primera generación de vergencia NE y otra SO. Dos generaciones tardías de cabalgamiento cortan las estructuras anteriores. El metamorfismo regional hercínico es de grado muy bajo.

Las mineralizaciones estratiformes

En la zona de Can Tintorer se hallan representadas estructuras correspondientes a las cuatro etapas de deformación hercínica, a las que cabe superponer la fracturación tardihercínica y alpina. Por tanto, la sucesión debe reconstruirse a partir de pequeñas series de detalle, como la establecida en la mina L, donde se aprecia que las mineralizaciones de fosfatos están intercaladas en la unidad de pizarras grises del Llandovertense Inferior. En esta serie de detalle pueden establecerse las siguientes unidades (fig. 3):

- tramo de hasta 1,5 m de potencia de alternancias decimétricas de niveles de pizarras grises y de chert de color oscuro, cuya potencia disminuye hacia techo del tramo y que están generalmente slumpizados;
- tramo de pizarras grises de hasta 1 m de potencia con niveles de chert más delgados, entre los cuales localmente aparecen los primeros niveles de fosfatos de potencia milimétrica;
- tramo de pizarras grises de hasta 1,5 m., rico en nódulos de chert de grandes dimensiones (hasta 50 cm de diámetro o más), que puede contener niveles de fosfatos de potencia milimétrica;
- tramo pizarroso en el que destacan escasos niveles de chert o fosfatos (hasta 2 m);
- tramo con finas alternancias de chert y pizarras, localmente con niveles delgados de apatito (hasta 1,5 m en total).

En todos los casos los niveles de fosfatos son esencialmente monominerálicos, de grano muy fino y de espesor variable, desde escasamente un milímetro hasta varios centímetros. Generalmente están constituidos por apatito o variscita ($AlPO_4 \cdot 2H_2O$), aunque localmente hay niveles de strengita o fosfosiderita ($FePO_4 \cdot 2H_2O$).

En cambio, en la mina de Can Tintorer, situada bajo la masía del mismo nombre en Gavà, la sucesión es diferente, como se deduce del corte de la figura 4. Sobre el tramo de pizarras con grandes nódulos de chert se halla un tramo de hasta 1 m de grueso constituido por niveles masivos de hematites alternando con pizarras parduzcas; a techo éstas pasan a ser dominantes. Así pues, cabría la posibilidad que el tramo de

fosfatos estuviera en posición lateral al tramo de óxidos de hierro. Además existen niveles del-

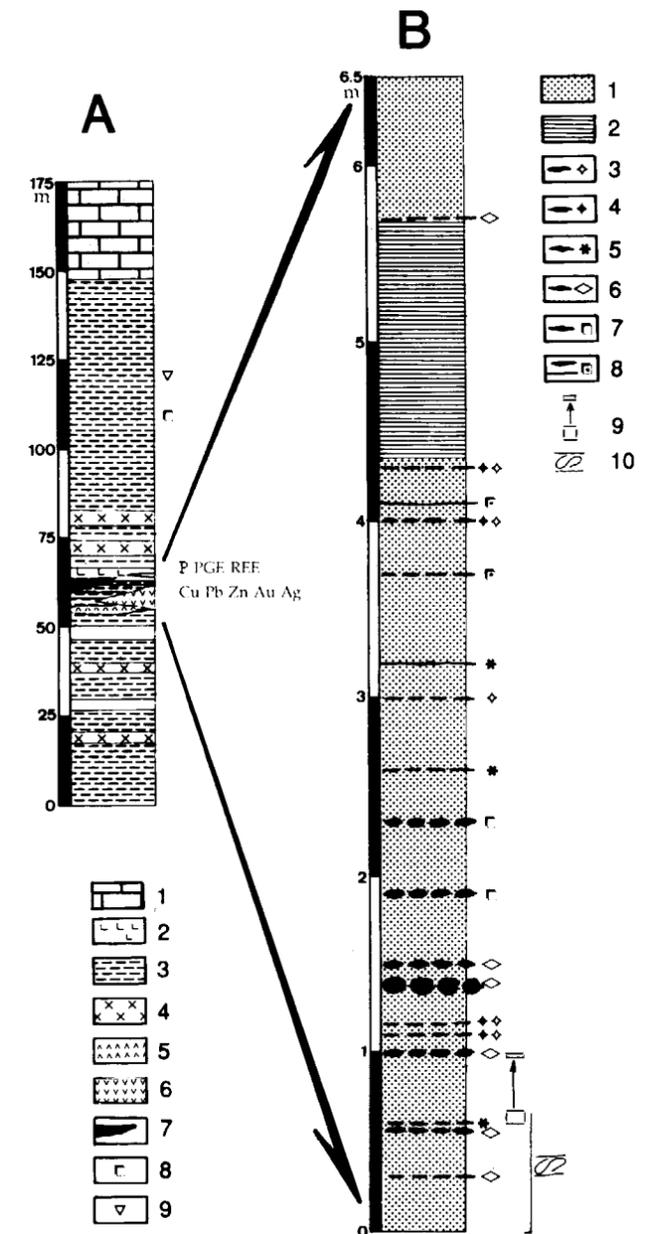


Figura 3.—Columna estratigráfica de detalle de las pizarras silúricas en la mina «L» (B), en relación a la estratigrafía silúrica regional (A). Leyenda (A): 1) calizas; 2) chert; 3) pizarras; 4) cuarcitas; 5) tobas volcánicas; 6) rocas volcánicas básicas; 7) sulfuros masivos; 8) nódulos de pirita; 9) nódulos carbonosos. Leyenda (B): 1) pizarras grises; 2) pizarras grises con finas capas de apatito y chert; 3) nódulos verdes de fosfatos (variscita); 4) nódulos de strengita; 5) nódulos de apatito; 6) nódulos de chert; 7) nódulos de pirita; 8) diseminaciones de cristales de pirita; 9) secuencia *thinning upwards*; 10) *slumps*.

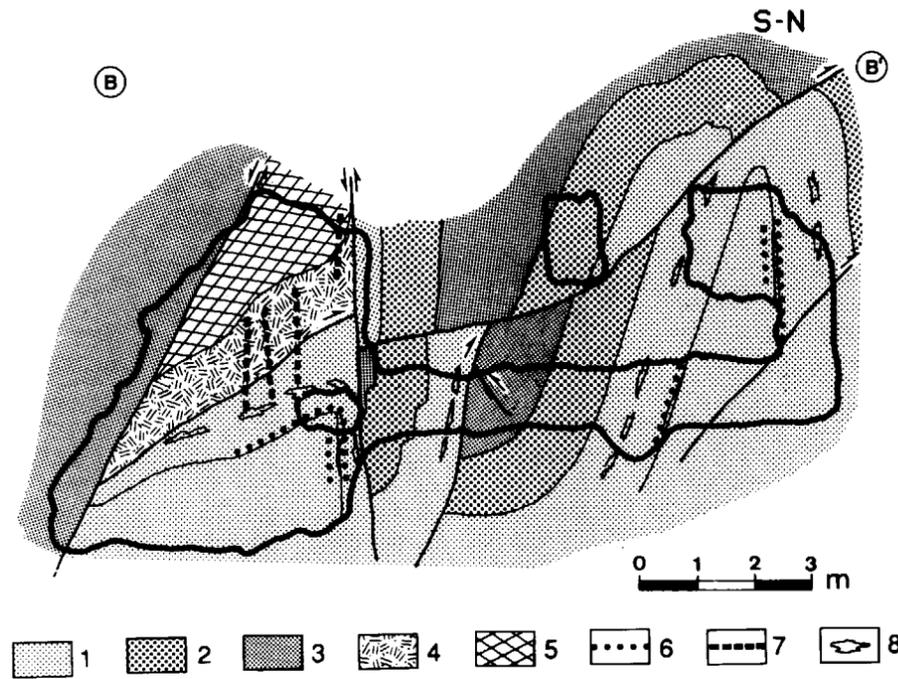


Figura 4.—Corte geológico de la mina de Can Tintorer (planta inferior). 1) pizarras grises con nódulos y niveles de chert y de fosfatos (Llandoveryense); 2) niveles de hematites; 3) pizarras marronosas; 4) niveles de strengita intercalados en pizarras; 5) niveles de jarosita; 6) niveles de variscita; 7) vetas de fosfatos (variscita, strengita, fosfosiderita); 8) nódulos de chert.

gados de nontronita intercalados entre las pizarras. En Can Tintorer, el tramo de fosfatos (que aquí alcanza 50 cm de potencia) consta de niveles de strengita o fosfosiderita, y se le superpone un tramo de jarosita masiva primaria de hasta 40 cm de potencia.

Las pizarras grises están constituidas por mica blanca, rica en Ba y V, y presentan abundantes disseminaciones de rutilo, pirita, calcopirita, barita y monacita.

Las mineralizaciones de fosfatos en vetas en pizarras

Este tipo de mineralización es muy abundante en el sector estudiado. A pesar de que algunas vetas de áreas próximas manifiestan evidencias de deformación dúctil (algunas de las cuales son manifiestamente sinquistosas y la mineralogía de las cuales no difiere en absoluto de las postquistosas), en las minas de Gavà la mineralización filoniana dominante es muy tardía en relación a la orogénesis hercínica. Las vetas son generalmente monominerálicas, y hay de dos tipos: de fosfatos férrico-alumínicos y de fosfatos cálcicos.

Las vetas de fosfatos de Fe-Al están constituidas por variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), strengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o fosfosiderita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o, más raramente, turquesa ($\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). El análisis químico mediante microsonda de estos minerales no revela diferencias significativas en relación al de los estratiformes. El contenido en algunos elementos menores (Cr, V) puede ser debido a que las pizarras encajantes son asimismo ricas en estos elementos. Muy frecuentemente estos fosfatos están asociados a sulfatos como jarosita ($\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) y alunita ($\text{KF}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$). Este grupo de fosfatos rellena diaclasas de direcciones dominantes N-S o NE-SO. A veces parecen asociadas a fracturas con brechificación hidráulica.

No se ha encontrado evidencias claras de ninguna deformación que afecte a las vetas. Los contactos con el encajante son netos y, como ocurre en la mineralización estratiforme, todos los minerales presentan textura criptocristalina; localmente se aprecian texturas esferulíticas asociadas a un ligero aumento en el tamaño de grano que indicarían fenómenos de recristalización en las vetas. En muchos casos puede verse cómo esta recristalización progresa a partir de

pequeñas fracturas dentro de la mineralización o a partir del contacto con el encajante.

Las vetas de fosfatos se localizan exclusivamente en el tramo de pizarras grises de la serie silúrica. El grosor de las vetas oscila entre 1 y 5 mm, aunque algunas de ellas llegan a 3 cm.

Los fosfatos de Ca aparecen muy tardíamente. La montgomeryita ($\text{Ca}_4\text{MgAl}_4(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) rellena parcialmente fracturas encajadas en las pizarras. Estas vetas tienen morfología y orientación irregulares, y contienen porosidad drúsica. La montgomeryita forma plaquitas de pocas decenas de micras o bien agregados radiales de las mismas, por lo común directamente implantados sobre la salbanda de la fractura, aunque a veces crecen sobre películas de goethita. La crandallita ($\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$), en cambio, es criptocristalina, y puede formar vetas o reemplazar fosfatos de la asociación Fe-Al a partir de discontinuidades existentes en la veta: pequeñas fracturas o contactos con el encajante.

Mineralizaciones de reemplazamiento de carbonatos

Los carbonatos del tránsito Silúrico-Devónico que afloran en el área de Gavà-Bruguers están a menudo afectados por un reemplazamiento irre-

gular a goethita de textura oquerosa y poco cristalina. Esta porosidad puede interpretarse en muchos casos como generada por disolución de carbonatos, pues se observan restos de ankerita. Dicha ankeritización y posterior reemplazamiento por hidróxidos de hierro se produce generalmente en las inmediaciones de cabalgamientos de las pizarras alumínicas del Llandoveryense sobre los carbonatos silúrico-devónicos (figs. 2 y 5), por lo que se supone que las superficies de cabalgamiento actuaron de canales de circulación (muy localizada) de fluidos hidrotermales. La mineralización es en este caso de fosfatos ricos en Fe, como tinticita, o de fosfatos de Ca, como calcioferrita, dufrenita y collinsita. Todos los fosfatos son tardíos con relación a la mayor parte de los óxidos, relleno de diaclasas o porosidad en los mismos (fig. 6).

La tinticita ($\text{Fe}^{3+}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), es el primer fosfato en formarse, ya sea en las vetas o en el relleno de porosidad tipo *vug* en los óxidos. En todos los casos es criptocristalina. Las vetas de tinticita son monominerálicas, presentan anchura variable desde menos de 1 mm hasta 2 cm y están orientadas al azar. Por otra parte, algunas presentan pliegues de morfología muy compleja. Puesto que no existen estos pliegues en las masas porosas de los óxidos encajantes, estos pliegues se interpretan como resultado de compactación diagenética. En otros casos la tin-

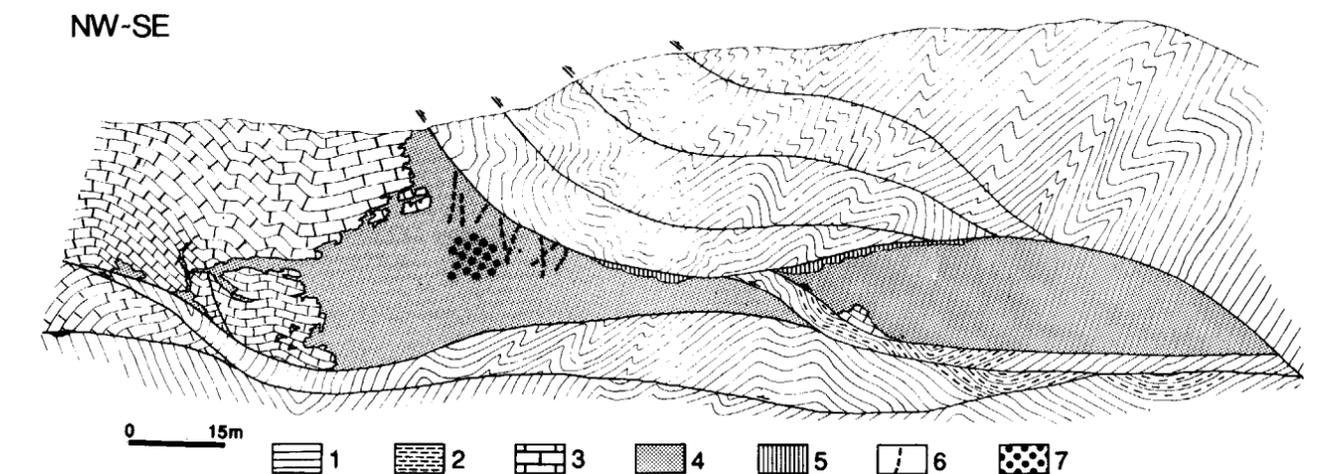


Figura 5.—Corte geológico de la zona de las minas de Rocabrúna. Leyenda: 1) pizarras grises (Llandoveryense); 2) Pizarras negras (Ludlowiense); 3) Calizas y dolomías (Silúrico Superior-Devónico Inferior); 4) masas de goethita; 5) cuerpos de jarosita masiva; 6) vetas de fosfatos (tinticita, calcioferrita, collinsita, dufrenita); 7) masas de reemplazamiento de limonita pulverulenta, con nódulos de tinticita.

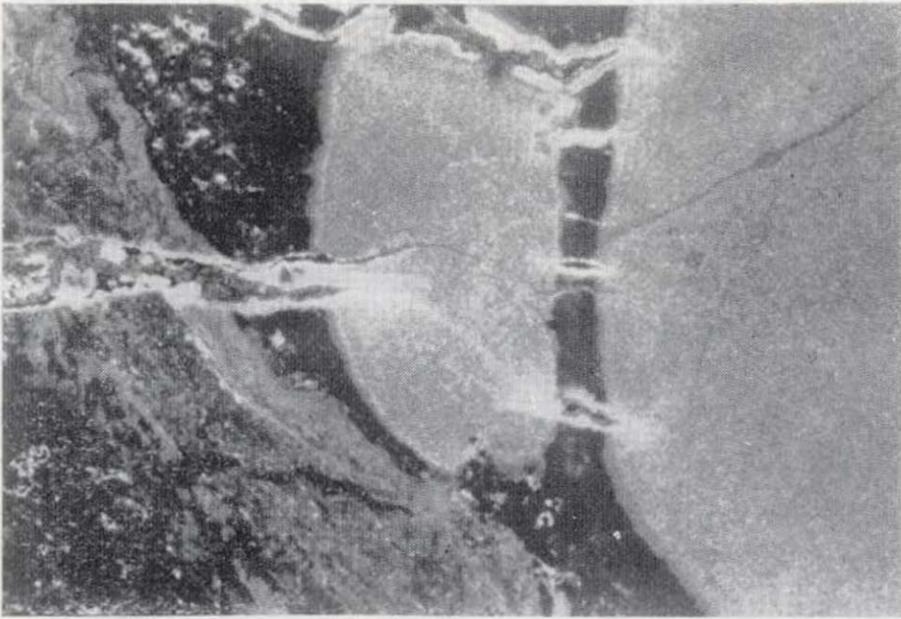


Figura 6.—Nódulos de tinticita incluidos en una masa terrosa de limonita, atravesados por vetas de hidróxidos de hierro; se aprecian crecimientos esferulíticos de collinsita, muy tardía, en las vetas, incluido en masa terrosa de limonita. Ancho del nódulo: 2 mm. Luz transmitida, sin analizador. Minas de Rocabrana.

ticitita forma nódulos de color crema cuyo diámetro oscila entre 1 mm y 10 cm, a menudo arracimados. Estos nódulos aparecen incluidos en una matriz de limonita pulverulenta que forma bolsadas irregulares dentro de la masa de óxidos, y que se interpreta como un reemplazamiento de los mismos. A menudo, estos nódulos son reemplazados en sus bordes por agregados radiales de calcioferrita verde (MELGAREJO et al., 1988). Los cristales de calcioferrita crecen desde los bordes en dirección al centro del núcleo.

Las vetas de fosfatos de Ca son más tardías, y presentan generalmente mucha porosidad drúsica. El primer mineral en formarse es calcioferrita, luego aparece dufrenita ($\text{CaFe}^{3+}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y finalmente collinsita ($\text{Ca}_2(\text{Mg})(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). La collinsita, pobre en Fe, forma abundantes crecimientos esferulíticos milimétricos (fig. 7), implantados sobre el resto de minerales.

Algunos análisis químicos representativos de nontronita y de los fosfatos de los diferentes tipos de mineralizaciones se hallan en la tabla 1. No parecen apreciarse variaciones composicionales notables entre fosfatos de diversas generaciones, al menos a nivel de componentes mayoritarios.

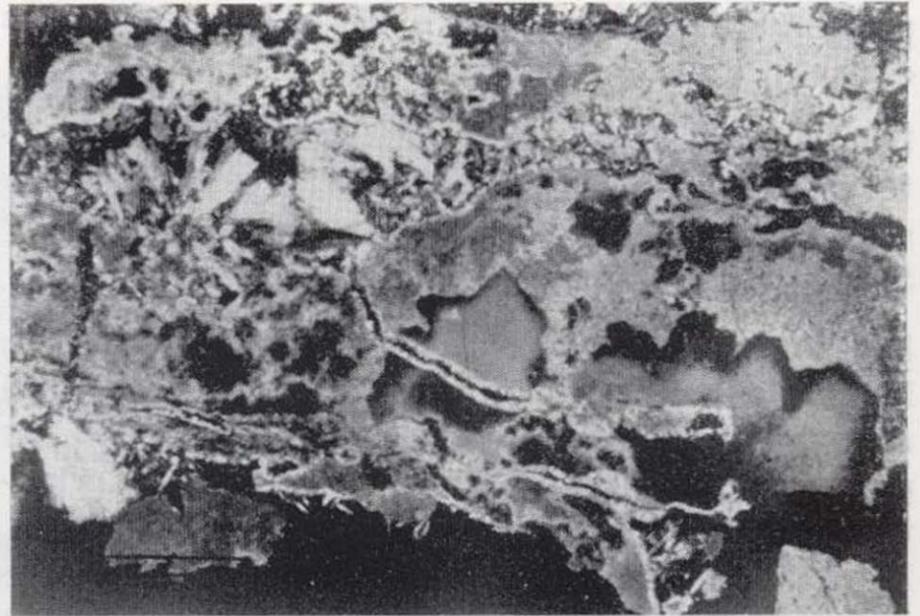


Figura 7.—Agregados esferulíticos de collinsita relleno de cavidades en la masa de goethita y jarosita. Diámetro del esferulito: 1,5 mm. Luz transmitida, nícoles cruzados. Minas de Rocabrana.

Discusión. Origen de las mineralizaciones

Las mineralizaciones estratiformes de fosfatos parecen formar un buen nivel guía en la base de la serie silúrica. En ausencia de condiciones aptas para el desarrollo bioquímico de fosfatos, podemos sugerir para ellas un origen exhalativo basado en las siguientes evidencias:

- a) la mineralización es estratiforme (encajada en sedimentos submarinos) y predeformativa;
- b) los minerales son primarios, por lo cual se puede descartar el reemplazamiento de fosfatos cálcicos;
- c) su asociación con niveles que pueden interpretarse como exhalativos (chert, hematites, nontronita, jarosita);
- d) asociación a anomalías de V, Ba, Cu y tierras raras;
- e) su contemporaneidad con vulcanismo alcalino básico (no presente en el área pero sí en otros puntos de los Catalánides, según GIL IBARGUCHI et al., 1990) o con depósitos de sulfuros masivos con Zn-Cu-EGP que intercalan a su vez niveles de apatito (MELGAREJO et al., 1994). Su asociación con niveles de jarosita o de hematites sugiere que su deposición aconteció en relación a soluciones fuertemente ácidas y oxidantes. En

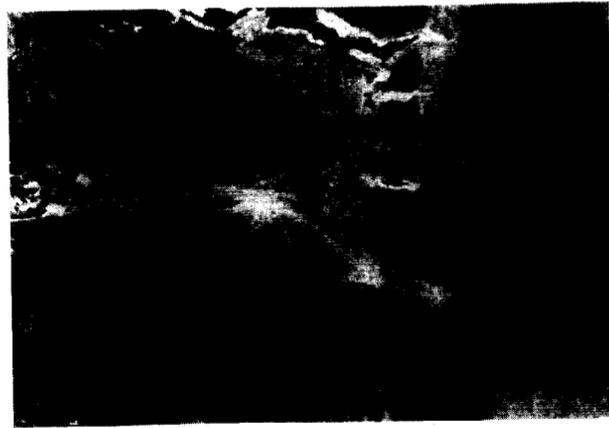


Figura 6.—Nódulos de tinticita incluidos en una masa terrosa de limonita, atravesados por vetas de hidróxidos de hierro; se aprecian crecimientos esferulíticos de collinsita, muy tardía, en las vetas, incluido en masa terrosa de limonita. Ancho del nódulo: 2 mm. Luz transmitida, sin analizador. Minas de Rocabrana.



Figura 7.—Agregados esferulíticos de collinsita relleno de cavidades en la masa de goethita y jarosita. Diámetro del esferulito: 1,5 mm. Luz transmitida, nícoles cruzados. Minas de Rocabrana.

Discusión. Origen de las mineralizaciones

Las mineralizaciones estratiformes de fosfatos parecen formar un buen nivel guía en la base de la serie silúrica. En ausencia de condiciones aptas para el desarrollo bioquímico de fosfatos, podemos sugerir para ellas un origen exhalativo basado en las siguientes evidencias:

- la mineralización es estratiforme (encajada en sedimentos submarinos) y predeformacional;
- los minerales son primarios, por lo cual se puede descartar el reemplazamiento de fosfatos cálcicos;
- su asociación con niveles que pueden interpretarse como exhalativos (chert, hematites, nontronita, jarosita);
- asociación a anomalías de V, Ba, Cu y tierras raras;
- su contemporaneidad con vulcanismo alcalino básico (no presente en el área pero sí en otros puntos de los Catalánides, según GIL IBARGUCHI et al., 1990) o con depósitos de sulfuros masivos con Zn-Cu-EGP que intercalan a su vez niveles de apatito (MELGAREJO et al., 1994). Su asociación con niveles de jarosita o de hematites sugiere que su deposición aconteció en relación a soluciones fuertemente ácidas y oxidantes. En

ticitita forma nódulos de color crema cuyo diámetro oscila entre 1 mm y 10 cm, a menudo arracimados. Estos nódulos aparecen incluidos en una matriz de limonita pulverulenta que forma bolsadas irregulares dentro de la masa de óxidos, y que se interpreta como un reemplazamiento de los mismos. A menudo, estos nódulos son reemplazados en sus bordes por agregados radiales de calcioferrita verde (MELGAREJO et al., 1988). Los cristales de calcioferrita crecen desde los bordes en dirección al centro del núcleo.

Las vetas de fosfatos de Ca son más tardías, y presentan generalmente mucha porosidad drúsica. El primer mineral en formarse es calcioferrita, luego aparece dufrenita ($\text{CaFe}^{3+}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y finalmente collinsita ($\text{Ca}_2(\text{Mg})(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). La collinsita, pobre en Fe, forma abundantes crecimientos esferulíticos milimétricos (fig. 7), implantados sobre el resto de minerales.

Algunos análisis químicos representativos de nontronita y de los fosfatos de los diferentes tipos de mineralizaciones se hallan en la tabla 1. No parecen apreciarse variaciones composicionales notables entre fosfatos de diversas generaciones, al menos a nivel de componentes ma-

	TUR	COL	STR*	STR**	VAR	NON
SiO ₂	-	-	-	-	-	51.33
P ₂ O ₅	34.76	43.67	38.24	36.30	44.59	-
Al ₂ O ₃	34.29	0.04	4.11	1.97	31.10	18.36
Cr ₂ O ₃	0.33	0.00	0.02	0.00	0.11	0.00
Fe ₂ O ₃	4.26	0.18	35.22	38.93	1.13	11.00
MgO	0.03	10.48	0.14	0.24	0.03	0.67
CaO	0.19	34.10	2.76	3.21	0.12	1.64
MnO	0.05	0.03	0.06	0.02	0.00	0.00
CuO	7.86	0.00	0.03	0.04	0.00	0.14
SrO	0.03	0.00	-0.07	0.01	0.02	0.00
BaO	0.20	0.00	0.00	0.00	0.13	0.12
Na ₂ O	0.08	0.00	0.09	0.05	0.08	0.01
K ₂ O	0.03	0.00	0.02	0.00	0.04	0.08
H ₂ O	17.63	11.07	19.40	18.41	22.61	16.64
TOTAL	99.74	99.61	100.16	99.18	99.96	100.00
Si ⁴⁺	-	-	-	-	-	1.87
P ⁵⁺	3.98	2.03	0.97	0.95	1.00	-
Al ³⁺	5.47	0.00	0.14	0.07	0.97	0.79
Cr ³⁺	0.04	-	0.00	0.00	0.00	-
Fe ³⁺	0.43	0.01	0.79	0.90	0.02	0.30
Mg ²⁺	0.00	0.86	0.01	0.01	0.00	0.04
Ca ²⁺	0.03	2.01	0.09	0.11	0.00	0.06
Mn ²⁺	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-
Cu ²⁺	0.80	-	0.00	0.00	-	0.00
Sr ²⁺	0.00	-	0.00	0.00	0.00	-
Ba ²⁺	0.01	-	0.00	-	0.00	0.00
Na ⁺	0.02	-	0.01	0.00	0.00	0.00
K ⁺	0.00	-	0.00	-	0.00	0.08
TOTAL	10.91	4.91	2.01	2.04	2.00	3.07

Tabla 1.—Análisis de microsonda electrónica. TUR: turquesa en venas tardías del solar de Can Tintorer. COL: collinsita de las minas de Rocabrana-Les Ferreres. STR*: strengita estratiforme de la mina Neolítica de Can Tintorer. STR**: strengita en nódulos de las minas de Rocabrana-Les Ferreres. VAR: variscita en venas tardías del solar de Can Tintorer. NON: nontronita en nódulos de la mina Neolítica de Can Tintorer. H₂O calculada por estequiometría.

medios ácidos, por otra parte, se optimiza la precipitación de fosfatos férricos o aluminicos más que de apatito (STUMM y MORGAN, 1981); la strengita, por su parte, requiere condiciones oxidantes, mientras que en un medio reductor se hubiera formado vivianita (NRIAGU, 1972).

Las mineralizaciones estratiformes de fosfatos pueden ser removilizadas por cualquier tipo de solución oxidante (hidrotermal o meteórica). En la serie silúrica abundan niveles con diseminaciones de piritita, en cuya lixiviación puede encontrarse la fuente de soluciones ácidas y oxidantes que han facilitado la extracción de fósforo de la serie silúrica. Estas soluciones ricas en P, circulando por fracturas u otra porosidad, depositan fosfatos secundarios cuya composición química depende de la de la roca encajante: fosfatos férrico-aluminicos en las pizarras (o localmente turquesa por lixiviación de calcopiritita), y fosfatos ricos en Fe o en Ca en la mineralización de goethita que reemplaza a los carbonatos. Nuevamente, la asociación con alunita o jarosita, o la propia composición de los fosfatos, abogan por su precipitación en medios ácidos y oxidantes. Por tanto, puede sugerirse un origen común a las mineralizaciones de fosfatos epigenéticos en pizarras y carbonatos. El origen final de las soluciones y su edad son problemas de más difícil solución. Para el caso de las vetas deformadas, presentes en la Serra de Miramar, podría plantearse un lavado de las pizarras por fluidos hidrotermales ligados al vulcanismo carbonífero. También en la Serra de Miramar aparece variscita en filones hidrotermales de cuarzo, sugiriendo una activación hidrotermal en relación al metamorfismo o a las intrusiones graníticas. El problema radica en las vetas de fosfatos férrico-aluminicos no deformadas y asociadas a fracturación hidráulica, comunes en Gavà y en otros sectores. En este caso, la mineralización puede asociarse a una activación tectónica tardihercínica, o incluso alpina.

Por otra parte, vetas de sulfatos y fosfatos aluminicos pueden formarse también por fenómenos meteóricos, bien sean actuales o antiguos. Así, DILL et al. (1991) citan en Sudán un caso muy parecido al que nos ocupa; en este caso demuestran mediante datación absoluta que la mineralización es de edad cuaternaria y en base a criterios geoquímicos que su origen es meteórico. Por tanto, en el caso que nos ocupa sólo podrán extraerse conclusiones definitivas respecto a la fuente de las soluciones mediante datación absoluta de cada tipología de mineralización epigenética. En la figura 8 se ofrece, a manera de síntesis, un esquema con los posibles mecanismos planteados para la génesis de las mineralizaciones del área.

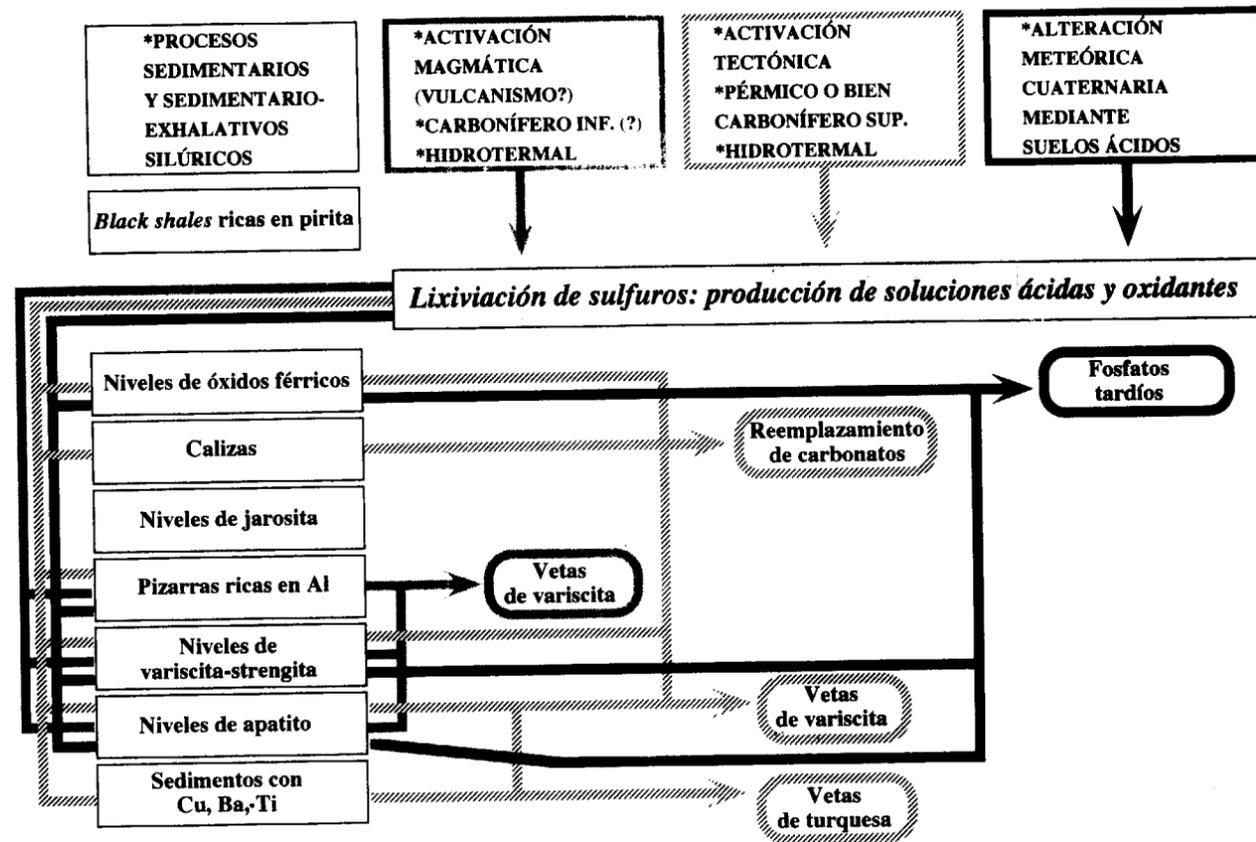


Figura 8.—Esquema de la evolución temporal de los depósitos de fosfatos del área de Gavà-Bruguers.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado gracias a un primer premio en el Certamen de Jóvenes Investigadores de 1992, concedido por la CICYT y el Instituto de la Juventud, y a un primer premio otorgado por la dirección XII de la Unión Europea en el *EU contest for Young Scientists* de 1993, así como por el proyecto CICYT AMB94-0953-CO2-01. Queremos agradecer la colaboración en el proyecto de Gabriel Sáez y Albert Arcas, y especialmente de María Cinta Salvany. Agradecemos al Museu de Gavà las facilidades en el acceso a las minas en todo momento, y a los *Serveis Científic-Tècnics de la Universitat de Barcelona* los análisis realizados, en particular a Xavier Alcega y Josep Bassa (DRX), Ramón Fontarnau (SEM-EDS), Xavier Llobet y Javier García-Veigas (microscopio electrónico).

REFERENCIAS

- ACOSTA, F.; CAMPRUBI, A.; SALVANY, M. C.; SAEZ, G.; ARCAS, A., y MELGAREJO, J. C. (1993): *The phosphate mineralizations from Gavà, Catalonia, Spain*. In: Fenoll et al. (coords.): *Current research in geology applied to ore deposits*: 715-718. Universidad de Granada.
- ALONSO, M.; EDO, M.; GORDO, L.; MILLAN, M., y VILLALBA, M. J. (1978): *Explotación minera neolítica en Can Tintorer (Gavà, Barcelona)*. *Pirenae*, 13-14: 7-14.
- CAMPRUBI, A.; COSTA, F.; SALVANY, M. C.; SAEZ, G., y ARCAS, A. (1993): *Las minas neolíticas de fosfatos de Gavà (Catalunya)*. Mem. Inédita Universitat de Barcelona. 63 pp.
- DILL, H. G.; BUSCH, K., y BLUM, N. (1991): *Chemistry and origin of vein-like phosphate mineralization, Nuba Mountains (Sudan)*. *Ore Geol. Rev.*, 6: 9-24.
- FERNANDEZ MARTOS, J. G. (1980): *Estudio del Paleozoico al oeste del río Llobregat entre Gavà y Pallejà*. Tesis de Licenciatura. Universitat Autònoma de Barcelona. Inédita. 85 pp.

FERNANDEZ TUIEL, J. L.; GIMENO, D.; PLANA, F.; BLASCO, A.; EDO, M., y VILLALBA, J. (1990): *Estudio de las mineralizaciones fosfáticas del complejo minero de Can Tintorer (Gavà, Barcelona) y comparación con las cuentas procedentes de ajuares arqueológicos*. *Bol. Soc. Esp. Min.*, 13-1: 86-87.

GARCIA-LOPEZ, S.; JULIVERT, M.; SOLDEVILA, J.; TRUYOLS-MASSONI, M., y ZAMARREÑO, I. (1990): *Bioestratigrafía y facies de la sucesión carbonatada del Silúrico Superior y Devónico Inferior de Santa Creu d'Olorda (Cadenas Costeras Catalanas, NE de España)*. *Acta Geol. Hisp.*, 25, 1-2: 141-168.

GIL IBARGUCHI, J. I.; NAVIDAD, M., y ORTEGA, L. A. (1990): *Ordovician and silurian igneous rocks and orthogneisses in the Catalan Coastal Ranges*. *Acta Geol. Hisp.*, 25, 1-2: 23-29.

JULIVERT, M.; MARTINEZ, F. J. (1983): *El Paleozoico de las Cordilleras Costeras Catalanas*. In: Comba, J. A. (coord.): *Geología de España*. ITGE, v. 1: 529-535.

JULIVERT, M.; DURAN, H.; RICHARDS, R. B., y CHAPMAN, A. (1985): *Siluro-Devonian graptolite stratigraphy of the Catalan Coastal Ranges*. *Acta Geol. Hisp.*, 20 (3/4): 199-207.

JULIVERT, M.; DURAN, H.; GARCIA-LOPEZ, S.; GIL IBARGUCHI, I.; TRUYOLS-MASSONI, M., y VILLAS, E. (1987): *Pre-Carboniferous rocks in the Catalan Coastal Ranges: volcanism, stratigraphic sequence and fossil content*. In: FLÜGEL, H. W., SASSI, F. P., y GRECULA, P. (coords.): *Pre-Variscan and Variscan events in the Alpine-Mediterranean mountain belts*. Mineralia Slovaca (monography): 313-322.

JULIVERT, M., y DURAN, H. (1990): *Paleozoic stratigraphy of the Central and Northern part of the Catalan Coastal Ranges (NE Spain)*. *Acta Geol. Hisp.*, 25 (1-2): 3-12.

MATA, J. M.; PLANA, F., y TRAVIERA, A. (1983): *Estudio mineralógico del yacimiento de fosfatos de Gavà*. *Bol. Soc. Esp. Min.*, 6: 257-258.

MELGAREJO, J. C. (1992): *Estudio geológico y metalogénico del Paleozoico del Sur de las Cordilleras Costeras Catalanas*. Memorias ITGE, 103, 605 pp.

MELGAREJO, J. C.; GALI, S., y AYORA, C. (1988): *Tinticite: new chemical and structural data*. *N. Jb. Miner. Mh.* 10: 446-453.

MELGAREJO, J. C.; JORGE, S.; TAYLOR, R. P., y JONES, P. (1994): *The occurrence of platinum group and Au-Ag-V-Cr-REE minerals in Lower Silurian sedimentary-exhalative (SEDEX) sulphide mineralization, Poblet, Catalonia, Spain*. *Abstr. 16th Gen. Meet. IMA, Pisa (Italy)*, p. 274.

NRIAGU, J. O. (1972): *Stability of vivianite and ion-pair formation in the system $Fe_3(PO_4)_2 \cdot H_3PO_4 \cdot H_2O$* . *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36: 459-470.

STUMM, W., y MORGAN, J. J. (1981): *Aquatic chemistry*. II ed. Wiley Interscience. 780 pp.

VILLALBA, M. J.; BAÑOLAS, L., y ARENAS, J. (1990): *Can Tintorer (Gavà, Catalunya): une exploitation néolithique de phosphates et silicates*. *Cahiers du Quaternaire*, 17. Le silex de sa genèse à l'outil. *Actes Vème Coll. Int. sur le silex*, 275-285.

Original recibido: Agosto de 1994.

Original aceptado: Septiembre de 1994.

AGUAS SUBTERRANEAS

El flujo no lineal hacia pozos de extracción en acuíferos de baja conductividad hidráulica.

Por D. PEREZ FRANCO (*)

RESUMEN

Hasta el presente se ha considerado que la existencia de flujo no lineal alrededor de pozos está limitada a acuíferos de alta conductividad hidráulica, y que la baja conductividad excluía esa posibilidad. Sin embargo, se demuestra analíticamente que la aparición del flujo no lineal no depende de la baja o la alta conductividad, sino de la relación entre la transmisibilidad Darciana, T_D y el cuadrado de la transmisibilidad turbulenta, T_T^2 .

Se analiza un caso clásico que aparece en la literatura como lineal y se demuestra que a pesar del pequeño caudal extraído y la baja conductividad del medio, ocurre flujo no lineal en una amplísima zona alrededor del pozo de bombeo, inclusive mayor que la correspondiente a casos de acuíferos de gran conductividad hidráulica reportados en la literatura.

Todo lo anterior implica la necesidad de analizar cualquier prueba de bombeo partiendo inicialmente de los criterios no lineales.

Palabras clave: Flujo no lineal, Acuífero, Pozo de extracción, Conductividad hidráulica.

ABSTRACT

It is the general belief that nonlinear flow towards wells appears only, in high conductivity aquifers. Nevertheless it is analytically demonstrated that the occurrence of nonlinear flow, does not depend on the magnitude of the conductivity but on the ratio between Darcian transmissibility, T_D , and the squared, turbulent transmissibility, T_T^2 .

A classical case appearing in the literature as linear is studied, and despite the low conductivity of the media and the small discharge extracted from the well, it is proved, that nonlinear flow occurs in an ample zone around the pumping well. This zone is more extense than the corresponding to high conductivity aquifers reported in the literature.

These results imply the necessity of analyzing any pumping test using nonlinear criteria from the beginning.

Key words: Nonlinear flow, Aquifer, Well, Hydraulic conductivity.

INTRODUCCION

Aunque la aparición del flujo no lineal en un acuífero durante la extracción de agua de un pozo se asocia comúnmente a medios de alta conductividad hidráulica [4], el flujo no lineal puede también presentarse en acuíferos de baja conductividad hidráulica cuando el caudal extraído provoca abatimientos suficientemente grandes. Como se sabe [4, 5], el radio Darciano, r_D , es la distancia radial medida desde el centro del pozo de extracción, más allá de la cual, el flujo puede considerarse lineal en todo el acuífero, de

modo que limita la zona alrededor del pozo dentro de la cual se produce flujo no lineal. El valor del radio Darciano está expresado por:

$$r_D = \frac{Q}{0,1\pi} \cdot \frac{K_D}{m K_T^2} = \frac{Q}{0,1\pi} \cdot \frac{T_D}{T_T^2} \quad [1]$$

donde:

Q, caudal constante extraído del pozo
 K_D , conductividad hidráulica darciana
 K_T , conductividad hidráulica turbulenta
 T_D , transmisibilidad hidráulica darciana
 T_T , transmisibilidad hidráulica turbulenta
 m , espesor saturado del acuífero.

Un examen de la ecuación [1], indica claramente que r_D depende del caudal extraído y de la relación T_D/T_T^2 . Si esta última relación es grande r_D será grande, independientemente de que los valores de ambas transmisibilidades sean grandes o pequeños. Lo anterior quiere decir, que el flujo no lineal puede aparecer, tanto en acuíferos de baja como en acuíferos de alta conductividad, siempre que la relación T_D/T_T^2 sea lo suficientemente grande. Pero los valores de las propiedades T_D y T_T (o K_D y K_T) se obtienen del análisis de las pruebas de bombeo realizadas en un pozo de un acuífero determinado, por lo que no se puede calcular el valor de r_D hasta que no se conozcan las propiedades del acuífero. Para saber entonces el tipo de flujo existente alrededor del pozo, y de ese modo decidir el criterio (lineal o no lineal) que debe utilizarse para analizar las pruebas de bombeo, es necesario apelar a algún otro método diferente al de calcular r_D . El autor ha desarrollado diversos métodos para identificar el régimen de flujo existente alrededor del pozo de bombeo [4, 3] y aunque recomienda aplicar a cualquier prueba los criterios no lineales de análisis, ya que el propio proceso de cálculo indicará si el flujo es lineal o no lineal, se presenta a continuación un nuevo método que resulta muy práctico para utilizarlo en el análisis de pruebas realizadas en acuíferos de baja conductividad, donde hasta el presente no se ha sospechado la existencia del flujo no lineal en zonas bastante alejadas del centro del pozo de bombeo.

Este nuevo método se aplicará como ejemplo a una prueba de pozo que aparece en la literatura sobre el tema y que ha sido exhaustivamente analizada con criterio lineal por diversos métodos, y se demostrará que el límite exterior de la zona de flujo no lineal alrededor del pozo de bombeo está bastante alejado del centro del mismo, y que por consiguiente, el comportamiento del flujo es no lineal para los piezómetros que están colocados en dicha zona y que lo correcto es analizar el problema con criterio no lineal.

NUEVO METODO PARA IDENTIFICAR EL REGIMEN DE FLUJO ALREDEDOR DE UN POZO DE BOMBEO

Si se parte de la formulación de JACOB (1) para flujo lineal impermanente se llega a la conclu-

sión de que para dos pozos de observación situados en la zona del acuífero donde el flujo es lineal, la diferencia entre sus abatimientos para un mismo tiempo está expresada como:

$$S_{r_1} - S_{r_2} = \frac{Q}{2 \mu T_D} \ln \frac{r_2}{r_1} = \Delta S_D \quad [2]$$

donde:

- S_{r_1} , abatimiento en el pozo de observación más cercano al pozo de bombeo;
- S_{r_2} , abatimiento en el pozo de observación más alejado del pozo de bombeo;
- r_1 , distancia radial desde el centro del pozo de bombeo al pozo de observación más cercano;
- r_2 , distancia radial desde el centro del pozo de bombeo al pozo de observación más alejado;
- ΔS_D , diferencia entre las componentes lineales del abatimiento.

Si los dos pozos (o al menos uno de ellos) están en la zona de flujo no lineal, partiendo del criterio general no lineal de flujo [4], la diferencia entre sus abatimientos para un mismo tiempo queda expresada por:

$$S_{r_1} - S_{r_2} = \frac{Q}{2 \pi T_D} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{Q^2(r_2 - r_1)}{4 \pi^2 T_T^2 r_1 r_2} \quad [3]$$

y también como:

$$S_{r_1} - S_{r_2} = \Delta S_D + \Delta S_T \quad [4]$$

donde:

ΔS_T , diferencia entre las componentes turbulentas del abatimiento.

Como puede observarse, el primer término del segundo miembro de las ecuaciones 3 y 4, es la ecuación 2, de donde resulta que para flujo no lineal la diferencia de abatimiento entre dos pozos de observación estará expresada por dicha diferencia para flujo lineal, más una cantidad debida a la no linealidad del flujo, que es numéricamente igual a la diferencia entre las componentes turbulentas del abatimiento en cada pozo

*) Instituto Superior Politécnico «José A. Echeverría», Habana, Cuba.

de observación. De aquí queda claro que la validez o no de utilizar para el análisis de la prueba el criterio lineal de flujo puede definirse una vez que se haya determinado T_D por métodos analíticos o gráficos, calculando el valor de ΔS_D a través de la ecuación 2.

Si ΔS_D calculada es sensiblemente igual a la diferencia real observada entre los abatimientos para un mismo tiempo de los dos pozos de observación, el flujo en la zona comprendida entre los pozos de observación podrá considerarse lineal y utilizar entonces los métodos conocidos de análisis para dicho tipo de flujo.

Si la diferencia real observada entre los abatimientos es mayor que el valor calculado de ΔS_D esto se deberá a que existe una componente turbulenta en los abatimientos y que el flujo es no lineal. La diferencia entre las componentes turbulentas de ambos pozos de observación, partiendo de la ecuación 4, quedará expresada como:

$$\Delta S_T = \frac{Q^2 (r_2 - r_1)}{4 \pi^2 T_T^2 r_1 r_2} = (S_{r_1} - S_{r_2}) - \Delta S_D \quad [5]$$

Esta ecuación permitirá determinar el valor de T_T sin ninguna dificultad.

Una vez conocido qué tipo de flujo existe, puede aplicarse el criterio adecuado (lineal o no lineal) para el análisis de los datos de la prueba de pozo.

ANÁLISIS DE UNA PRUEBA DE POZO EN UN ACUIFERO DE BAJA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA

En la tabla 1 aparecen los resultados de una prueba de bombeo en *Oude Korendijk* que ha sido analizada por KRUSEMAN (2) con criterio lineal por varios métodos. La figura 1 presenta

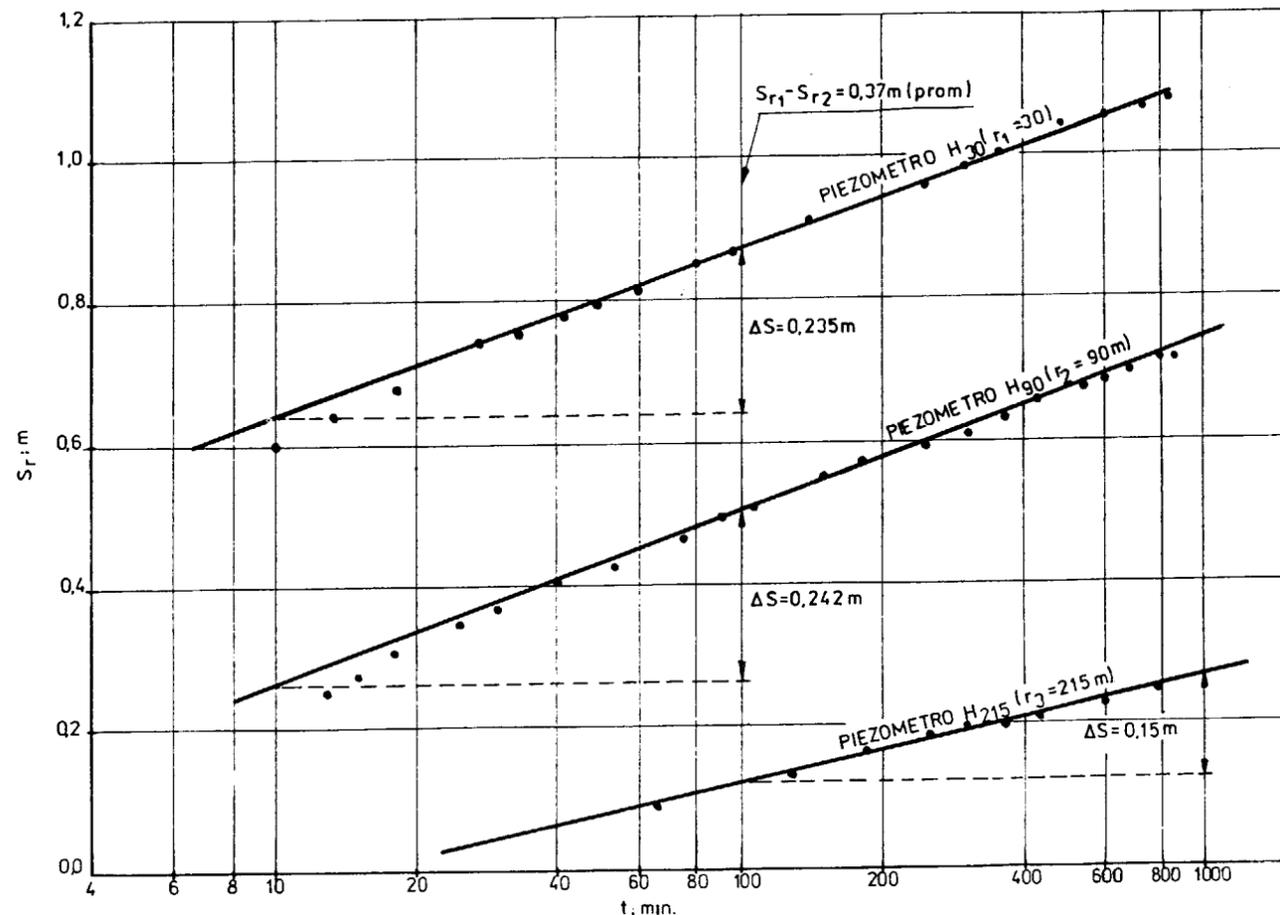


Figura 1.—Gráficos semilogarítmicos de los resultados de las pruebas.

el análisis de dicha información por el método del gráfico semilogarítmico de tiempo-abatimiento. Los piezómetros H_{30} y H_{90} tienen un comportamiento totalmente similar, por lo que la transmisibilidad hidráulica, T_D , puede calcularse como el promedio para ambos piezómetros, en la zona comprendida entre los mismos. La diferencia de abatimiento promedio por ciclo logarítmico de tiempo resulta ser:

$$\Delta S = \frac{1}{2} (0,235 + 0,242) = 0,2385 \text{ m}$$

Valor que se utiliza para calcular T_D , a través de la ecuación:

$$T_D = \frac{2,3026}{4 \pi} \cdot \frac{Q}{\Delta S} \quad [6]$$

Como se sabe [6] la determinación de T_D por la ecuación 6 es válida tanto para flujo lineal como no lineal. De modo que para los piezómetros H_{30} y H_{90} , resultará, como $Q = 788 \text{ m}^3/\text{día}$

$$T_D = \frac{2,3026}{4 \pi} \cdot \frac{788}{0,2385} = 605,4 \text{ m}^2/\text{día}$$

La diferencia promedio de abatimiento entre ambos piezómetros al analizar la figura 1, resulta ser:

$$S_{r_1} - S_{r_2} = 0,37 \text{ m}$$

Si ahora se calcula la diferencia en abatimiento lineal, ΔS_D , de acuerdo con la ecuación 2,

$$\Delta S_D = \frac{Q}{2 \pi T_D} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{788}{2 \pi \cdot 605} \ln \frac{90}{30} = 0,228 \text{ m}$$

Como se ve:

$$S_{r_1} = S_{r_2} > \Delta S_D (0,37 \text{ m} > 0,228 \text{ m})$$

y

$$\Delta S_T = 0,37 - 0,228 = 0,142 \text{ m}$$

Luego, en realidad el flujo en el acuífero es no lineal y no es correcto analizarlo por métodos lineales, lo que conduciría a errores considerables en el cálculo de coeficiente de almacenamiento, E , y en la predicción del comportamiento del acuífero para otros caudales [6].

Continuando el análisis con los métodos no lineales desarrollados por el autor [4, 7] se puede calcular T_T a partir de la ecuación 5, como:

$$T_T = \left[\frac{Q^2 (r_2 - r_1)}{4 \pi^2 r_1 r_2 \Delta S_T} \right]^{1/2} \quad [7]$$

Luego:

$$T_T = \left[\frac{(788)^2 (90 - 30)}{4 \pi^2 \cdot 30 \cdot 90 \cdot 0,142} \right]^{1/2} = 49,6 \text{ m}^2/\text{día}$$

Para calcular el coeficiente de almacenamiento, E puede utilizarse el procedimiento gráfico modificado para flujo no lineal [6], o hacerlo a través de un procedimiento analítico como el que sigue:

Se sabe que para flujo lineal impermanente [1, 4] el abatimiento S_D , a una distancia r , para el tiempo t , es:

$$S_D = \frac{Q}{4 \pi T_D} \ln \frac{2,246 T_D t}{r^2 E} \quad [8]$$

Para dos tiempos diferentes t_A y t_B ($t_B > t_A$) la diferencia en abatimiento, ΔS_{B-A} resultará [4]:

$$\Delta S_{B-A} = \frac{Q}{4 \pi T_D} \ln \frac{t_B}{t_A} \quad [9]$$

Si se hace $t_A = t_0$, siendo t_0 el tiempo ficticio de la recta semilogarítmica donde $S_D = 0$, resultará:

$$\Delta S_{B-A} = S_{DB} = \frac{Q}{4 \pi T_D} \ln \frac{t_B}{t_0} \quad [10]$$

donde S_{DB} , componente lineal del abatimiento para $t = t_B$.

De donde resulta que si se conoce el abatimien-

to lineal para cualquier tiempo, el valor de t_0 puede calcularse a partir de la ecuación 10 y el valor de E , utilizando la ecuación [4]:

$$E = \frac{2,246 T_D t_0}{r^2} \quad [11]$$

Por otra parte, se sabe que para flujo no lineal, el abatimiento S_r a una distancia r del centro del pozo, puede expresarse como:

$$S_r = \frac{Q}{4 \pi T_D} \ln \frac{r_0^2}{r} + \frac{Q^2(r_0 - r)}{4 \pi^2 T_T^2 r r_0} \quad [12]$$

donde, r_0 , es el radio de influencia, que puede calcularse a través de la ecuación:

$$r_0 = \left(\frac{2,246 T_D t}{E} \right)^{1/2} \quad [13]$$

En la ecuación 12 el primer término del segundo miembro es la componente lineal del abatimiento y el segundo término, la componente turbulenta del abatimiento. Si se calcula esta última; por diferencia con el abatimiento real para un tiempo determinado, se podrá calcular la componente lineal del abatimiento para dicho tiempo y utilizando la ecuación 10 calcular el coeficiente de almacenamiento, E , que sería la propiedad del acuífero que faltaría por determinar después de haber determinado T_D y T_T .

De acuerdo con la ecuación 13, para conocer r_0 se necesita conocer E , por lo que se hace necesario, suponer primero un valor de r_0 , calcular la componente turbulenta del abatimiento, determinar S_{DB} por diferencia con el abatimiento real en un tiempo determinado y con las ecuaciones 10 y 11, calcular un valor aproximado de E , que servirá para calcular r_0 según la ecuación 13 y a partir de dicho valor ir aproximándose al valor de E .

Este procedimiento se ilustra a continuación para la prueba de pozo de *Oude Korendijk* [2].

Calculando la componente turbulenta del abatimiento S_T , para $t = 600$ min en el piezómetro H_{30} suponiendo $r_0 = 1000$ m y sabiendo que $S_r = 1,053$ m (tabla 1) resulta:

$$S_T = \frac{Q^2 (r_0 - r)}{4 \pi^2 T_T^2 r r_0} = \frac{(788)^2 (1000 - 30)}{4 \pi^2 (49,6)^2 30 \cdot 1000} = 0,207 \text{ m}$$

$$S_{DB} = S_r - S_T = 1,053 - 0,207 = 0,846 \text{ m}$$

De acuerdo con la ecuación 10

$$S_{DB} = \frac{Q}{4 \pi T_D} \ln \frac{t_B}{t_0} = \frac{788}{4 \pi \cdot 605,4} \ln \frac{600}{t_0} = 0,846$$

Luego:

$$t_0 = 0,17 \text{ min.}$$

y de acuerdo con la ecuación 11, el valor aproximado de E será:

$$E = \frac{2,246 \cdot 605,4 \cdot 0,17/1440}{30^2} = 1,78 \cdot 10^{-4}$$

Con este valor de E se calcula r_0 para $t = 600$ min. por la ecuación 13.

$$r_0 = \left(\frac{2,246 \cdot 605,4 \cdot 600/1440}{1,78 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} = 1784,06 \text{ m}$$

Suponiendo $r_0 = 1760$ m y omitiendo los cálculos resultará

$$\begin{aligned} S_T &= 0,209 \text{ m} \\ S_{DB} &= S_r - S_T = 0,844 \text{ m} \\ t_0 &= 0,1735 \text{ min} \\ E &= 1,82 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Recalculando r_0 , con ese valor de E para $t = 600$ minutos se obtiene:

$$r_0 = 1764 \text{ m}$$

Valor que tiene una diferencia de aproximadamente 0,22 por 100 con el valor de 1760 m supuesto, por lo que se puede aceptar $E = 1,82 \cdot 10^{-4}$ y las propiedades del acuífero de *Oude Korendijk* resultarán:

$$\begin{aligned} T_D &= 605,4 \text{ m}^2/\text{día} \\ T_T &= 49,6 \text{ m}^2/\text{día} \\ E &= 1,82 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Si se calcula r_D para el caudal extraído de 788 m³/día se obtiene de acuerdo con la ecuación 1

$$r_D = \frac{Q}{0,1 \pi} \cdot \frac{T_D}{T_T^2} = \frac{788}{0,1 \pi} \cdot \frac{605,4}{(49,6)^2} = 617,2 \text{ m}$$

que indica que si las propiedades calculadas se mantuvieran para todo el acuífero, la zona no lineal se extendería en un radio de 617,2 m alrededor del pozo para el pequeño caudal que representan 788 m³/día.

El piezómetro H_{215} se encontraría, de acuerdo con esto, en la zona no lineal, pero analizando la figura 1 se ve claramente que en esa zona han cambiado las propiedades del acuífero y, por consiguiente, habría que hacer un análisis particular para el piezómetro H_{215} .

Resulta interesante comparar el valor de r_D obtenido para este acuífero de baja conductividad, con el que corresponde, por ejemplo, a otro de mayor conductividad [7] cuyas propiedades hidráulicas son:

$$\begin{aligned} T_D &= 0,0637 \text{ m}^2/\text{s} = 5503,7 \text{ m}^2/\text{día} \\ T_T &= 0,034 \text{ m}^2/\text{s} = 2937,6 \text{ m}^2/\text{día} \end{aligned}$$

y del cual se extraen 90 L/s (7776 m³/día) de un pozo de bombeo. Teniendo en cuenta la ecuación 1 resulta para este acuífero:

$$r_D = \frac{Q}{0,1 \pi} \cdot \frac{T_D}{T_T^2} = \frac{7776}{0,1 \pi} \cdot \frac{5503,7}{(2937,6)^2} = 15,79 \text{ m}$$

de donde resulta que para el acuífero de mayor conductividad, la zona de flujo no lineal es mucho menor que la que corresponde al acuífero de baja conductividad. Como puede apreciarse esto se debe fundamentalmente a la diferencia entre las relaciones T_D / T_T^2 de ambos acuíferos.

TABLA 1
Prueba de bombeo en «Oude Korendijk» [2]
(Q = 788 m³/día)
Piezómetro H₃₀ (r₁ = 30 m)

t(min)	S _r (m)	t(min)	S _r (m)	t(min)	S _r (m)
0	0	5,35	0,50	80	0,855
0,1	0,04	6,80	0,54	95	0,873
0,25	0,08	8,3	0,57	139	0,915
0,50	0,13	8,7	0,58	181	0,935
0,70	0,18	10,0	0,60	245	0,966
1,0	0,23	13,1	0,64	300	0,990
1,40	0,28	18	0,680	360	1,007
1,90	0,33	27	0,742	480	1,050
2,33	0,36	33	0,753	600	1,053
2,80	0,39	41	0,779	728	1,072
3,36	0,42	48	0,793	830	1,088
4,00	0,45	59	0,819		

Piezómetro H₉₀ (r₂ = 90 m)

t(min)	S _r (m)	t(min)	S _r (m)	t(min)	S _r (m)
0	0	9	0,206	120	0,528
1,5	0,015	13	0,250	150	0,550
2,0	0,021	15	0,275	180	0,569
2,16	0,023	18	0,305	248	0,593
2,66	0,044	25	0,348	301	0,614
3	0,054	30	0,364	363	0,636
3,5	0,075	40	0,404	422	0,657
4	0,090	53	0,429	542	0,679
4,33	0,104	60	0,444	602	0,688
5,5	0,133	75	0,467	680	0,701
6	0,153	90	0,494	785	0,718
7,5	0,178	105	0,507	845	0,716

Piezómetro H₂₁₅ (r₃ = 215 m)

t(min)	S _r (m)	t(min)	S _r (m)	t(min)	S _r (m)
0	0	251	0,186	606	0,227
66	0,089	305	0,196	780	0,250
127	0,138	366	0,207		
185	0,165	430	0,214		

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que el flujo no lineal puede presentarse tanto en acuíferos de alta conductividad hidráulica como en acuíferos de baja conductividad y que la ocurrencia del flujo no lineal

depende fundamentalmente de la relación T_D/T_T^2 . Se ha visto además que en un caso clásico reportado en la literatura y analizado como lineal, aparece flujo no lineal en una amplia zona alrededor del pozo de bombeo, inclusive mayor que la correspondiente a casos de acuíferos de mayor conductividad.

Todo esto indica la necesidad de analizar cualquier prueba de bombeo partiendo inicialmente de los criterios no lineales de flujo establecidos por el autor [4, 8], ya que si el flujo es lineal el propio proceso de análisis lo indicará.

Sin embargo, si se analizan las pruebas de pozo inicialmente con los criterios lineales acostumbrados no se tendrá dentro de los pasos normales del proceso ninguna indicación de que no se están utilizando los criterios correctos, y se podrán cometer errores de consideración en el cálculo de las propiedades hidrogeológicas.

REFERENCIAS

- 1.—COOPER, H. H., y JACOB, C. E. (1946): *A generalized graphical method for evaluating formation constants*

and summarizing well-field history. Trans. Am. Geophysical Union, Vol. 27, pp. 526-534.

- 2.—KRUSEMAN, G. P., y DE RIDER, N. A. (1970): *Analysis and evaluation of pumping test data.* Bulletin 11, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- 3.—PEREZ FRANCO, D. (1981): *Identificación práctica del régimen de flujo existente alrededor de un pozo de bombeo.* Ingeniería Hidráulica, Vol. 2, Núm. 1, pp. 17-25.
- 4.—PEREZ FRANCO, D. (1982): *Hidráulica subterránea.* Editorial Científico-Técnica, La Habana.
- 5.—PEREZ FRANCO, D. (1978): *Imagen general del flujo radial hacia un pozo. Zonas y límites.* Voluntad Hidráulica, Núm. 47/48, pp. 3-6.
- 6.—PEREZ FRANCO, D. (1981): *La utilización de los gráficos de tiempo-abatimiento y distancia-abatimiento en flujo no lineal.* Ingeniería Hidráulica, Vol. 2, Núm. 3, pp. 227-238.
- 7.—PEREZ FRANCO, D. (1980): *Un segundo método para calcular las propiedades hidráulicas de un acuífero por prueba de pozo con flujo no lineal.* Voluntad Hidráulica, Núms. 52/53, pp. 46-52.
- 8.—PEREZ FRANCO, D. (1983): *Analyzing pumping tests with nonlinear flow in the aquifer.* Proceedings International Conference on groundwater and man. Sidney, Australia. December.

Original recibido: Noviembre de 1993.
Original aceptado: Marzo de 1994.

Modelos de administración óptima del acuífero Ariguanabo.

Por F. DILLA SALVADOR (*) y H. R. MESA SANCHEZ (**)

RESUMEN

En este trabajo describimos la formulación y aplicación de tres modelos de administración del agua subterránea para determinar la política operacional óptima de un acuífero regional en la provincia de La Habana, Cuba. La respuesta hidráulica del sistema acuífero es representada por un modelo de simulación que está vinculado a un modelo de optimización y administración mediante las funciones tecnológicas algebraicas.

Palabras clave: Acuífero Regional, Modelo de Simulación, Modelo de Administración, Funciones tecnológicas algebraicas.

ABSTRACT

This paper describes the design and employment of three underground water management models to establish the optimum operational policy for a regional aquifer located at La Havana province, in Cuba. The hydraulic response of the aquifer system is represented by a simulation model related to a management and optimization model by means of algebraic technological functions.

Key words: Regional aquifer, simulation model, management model, algebraic technological functions.

INTRODUCCION

En el acuífero Ariguanabo se realizó un estudio de simulación matemática del agua subterránea y en cierta medida del comportamiento del agua superficial con el objetivo de eliminar las grandes inundaciones en pueblos y obras importantes que surgían en eventos extraordinarios, como el de septiembre de 1979 por citar el ocurrido más recientemente.

Una vez que este modelo fue calibrado y verificado, se formularon y ensayaron algunos esquemas históricos extremos, períodos de cinco años extremadamente húmedos o secos. Los resultados de esta simulación de períodos largos mostraron que los esquemas de desarrollo para la explotación empleados, no eran del todo aceptables debido a que los abatimientos producidos en algunas áreas eran excesivos.

(*) Profesor Titular. Facultad de Ingeniería Civil, CIH, ISPJAE. Ciudad de La Habana, Cuba.

(**) Profesor Asistente. Facultad de Ingeniería Civil, ISPJAE. Ciudad de La Habana, Cuba.

Se decidió entonces que en lugar de ensayar esquemas alternativos decididos a priori, acoplar el modelo de simulación con un modelo de optimización con la finalidad de obtener los esquemas de desarrollo óptimos. Esta vinculación se realizó introduciendo las llamadas funciones respuesta o funciones tecnológicas algebraicas presentadas por Maddock III.

MODELO DE SIMULACION

El acuífero Ariguanabo, ubicado en la provincia de La Habana, Cuba, ha sido estudiado en fecha reciente por medio de modelos matemáticos de simulación del agua subterránea, AQUIMPE, desarrollado por J. B. Martínez, y del balance hídrico en el suelo de cobertura, EVABAL, realizado por Andrés Duranza.

El acuífero en estudio es semicerrado con una extensión de 259,7 Km² tal como se muestra en la figura 1, con un único contorno de descarga

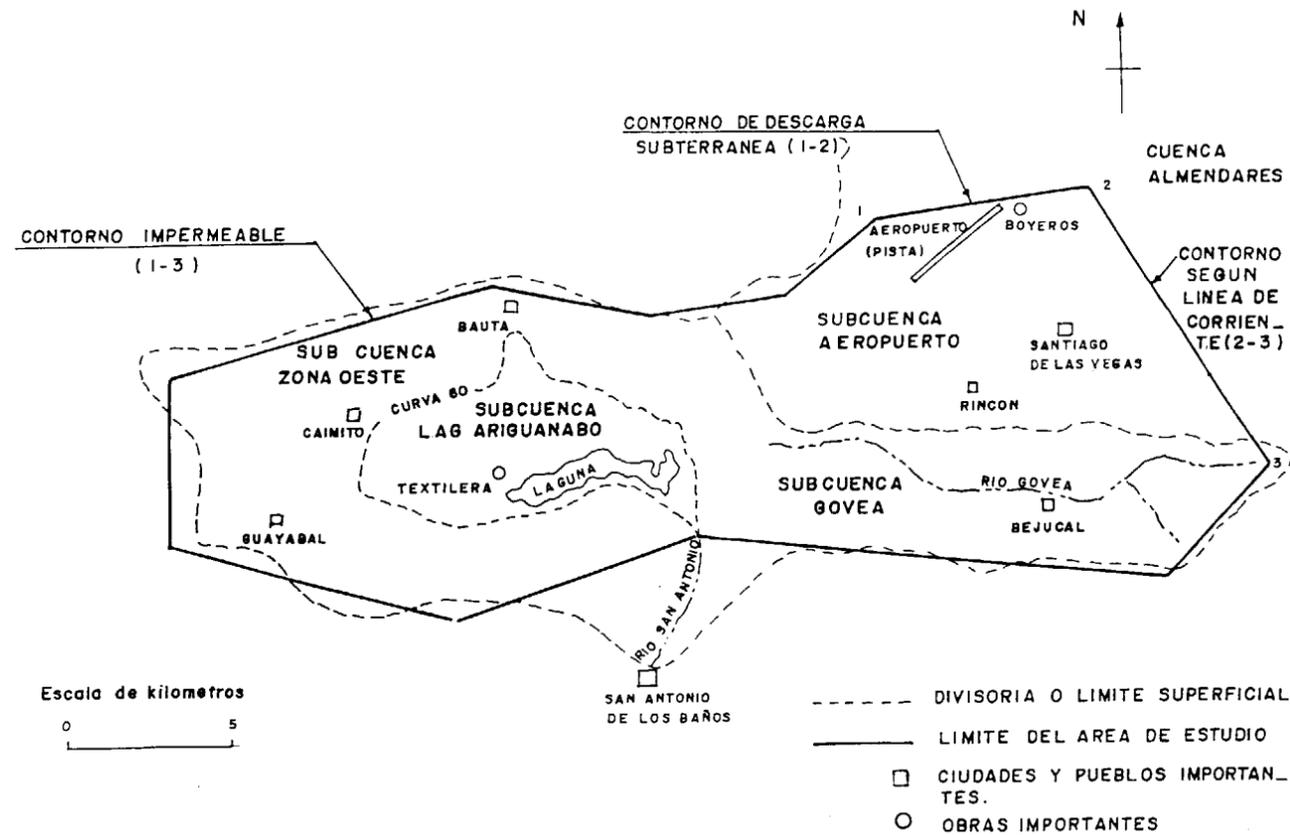


Figura 1.—Cuenca Ariguanabo-Almendrales.

subterránea, 1-2, hacia el acuífero vecino Vento-Almendrales y el resto del contorno impermeable, 1-3, y el 2-3 que se hizo coincidir con una línea de flujo.

La discretización final empleada en la etapa de calibración del modelo de simulación se presenta en la figura 2, consta de 46 triángulos y 113 nodos o vértices principales. Como resultados

importantes de esta etapa se obtienen los parámetros hidrogeológicos representativos en cada elemento (tabla 1), y las leyes de infiltración debido a la lluvia por zonas o agrupación de varios elementos; también se precisa el tratamiento de la frontera de descarga, bien fijando a priori una descarga subterránea o unas cotas piezométricas en contorno.

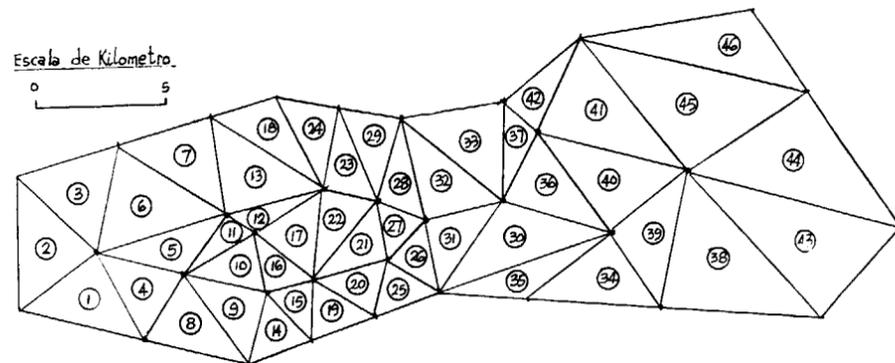


Figura 2.—Discretización de la zona de estudio.

La extracción global del acuífero se realiza por cientos de pozos de bombeo que se encuentran concentrados en 53 nodos del modelo.

algebraicas o funciones respuesta del abatimiento se expresan por:

$$S(K, N) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \beta(K, j, N-i+1) Q(j, i)$$

donde:

S(K, N): abatimiento en el pozo K al final del período de bombeo N, dimensiones L.

$\beta(K, j, N-i+1)$: abatimiento promedio en el pozo K al final del período de bombeo N debido a una pulsación unitaria de bombeo en el pozo j aplicada durante el período de bombeo i, dimensiones TL^{-2} .

Q(j, i): razón volumétrica media de extracción en el pozo de bombeo j durante el período de bombeo i, dimensiones L^3T^{-1} .

M: número total de pozos de extracción por bombeo.

N: horizonte de planeamiento de los esquemas de desarrollo óptimos de la explotación futura del acuífero, dimensiones T.

Los coeficientes β se obtuvieron usando el paquete de programas AQUIMPE para la simulación del flujo impermanente bidimensional de una cuenca acuífera subterránea a escala regional, que utiliza el método de los elementos finitos y el triángulo cuadrático como figura básica para la discretización.

El estado inicial utilizado fue el correspondiente a abril de 1982, que se estima como una situación media normal en el sistema acuífero.

En el problema de optimización se seleccionan 14 nodos del total de 53 nodos de explotación, M, en donde se concentra entre el 90-95 por 100 de la demanda semestral, manteniéndose constante la extracción en los nodos restantes. El horizonte de planeamiento, N, es de cinco años divididos en semestres. Se han escogido para la verificación del modelo, dos períodos históricos contrastantes: un período seco prolongado (de mayo de 1961 a abril de 1966) con una lluvia media anual de 1.264 mm y un período húmedo prolongado (de mayo de 1941 a abril de 1945) con lluvia media anual de 2.353 mm.

A partir del estado inicial real del sistema acuífero se simuló solamente el efecto de la lluvia

TABLA 1

Propiedades hidrogeológicas de los triángulos

Tipo	Transmisibilidad Darciana TD (m ² /día)	Coefficientes de almacenamiento E (adim)	Triángulos
1	50,0	0,01	2, 3, 6, 7, 13
2	30,0	0,01	38, 39, 43
3	100,0	0,05	23, 28, 29, 32, 33, 42
4	30,0	0,10	4, 8, 9, 14, 15, 19, 20, 25
5	2.000,0	0,05	18, 24
6	500,0	0,10	34
7	750,0	0,01	5
8	15.000,0	0,15	37, 41, 45
9	5.000,0	0,15	36, 40
10	2.500,0	0,06	10, 11, 12, 16, 17, 21, 22
11	3.000,0	0,15	46
12	25.000,0	0,15	26, 27, 30, 31
13	400,0	0,01	1
14	100,0	0,01	44
15	200,0	0,20	35

FUNCIONES TECNOLOGICAS ALGEBRAICAS

Si el flujo subterráneo en el acuífero es aproximadamente bidimensional, es decir, si el flujo vertical es insignificante como ocurre en los acuíferos artesianos con pozos completamente penetrados o acuíferos libres en los cuales el abatimiento es siempre menor que el espesor saturado, entonces es posible construir funciones tecnológicas algebraicas que relacionen de manera lineal el abatimiento en los pozos de bombeo como función de la extracción o bombeo realizados durante diferentes períodos de tiempo.

Las funciones tecnológicas algebraicas existen aun cuando el acuífero tiene fronteras con formas irregulares o paramétricas de flujos no homogéneos, tales como la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento.

Usando la teoría de sistemas lineales y funciones de Green Maddock III [1], ha mostrado que la forma discreta de las funciones tecnológicas

pronóstico, sin realizar ninguna extracción por bombeo y al estado del acuífero al final del horizonte de planeamiento N, así obtenido, lo denotamos por h_k^0 . A continuación simulamos el efecto de un pulso o extracción unitario Q_0 en el pozo de bombeo j aplicado durante el período de bombeo i, al final del horizonte N, manteniendo igual todo el tratamiento de las entradas y contornos del sistema acuífero realizado en el paso anterior. A este estado así obtenido lo denotamos por $h(K, j, i)$. Este procedimiento se realizó para cada uno de los 14 pozos de explotación en cada uno de los diez intervalos de tiempo, lo que requirió 140 corridas del paquete AQUIMPE. El pulso o extracción unitario, Q_0 , es arbitrario, en nuestro caso tomamos

$$Q_0 = 40 \text{ hm}^3/\text{sem.}$$

Los coeficientes β , abatimientos en el pozo k-ésimo al final del período de bombeo N, asociados a los pulsos o extracciones unitarias Q_0 en los pozos j efectuados a través de los períodos de bombeo i, se calcularon como sigue:

$$\beta(K, j, N-i+1) = \frac{h_k^0 - h(K, j, i)}{Q_0}$$

Para nuestro problema de $M = 14$ pozos de extracción y $N = 10$ semestres se calcularon 1.960 coeficientes β .

En nuestro trabajo arribamos a las conclusiones siguientes sobre los coeficientes β :

- 1) son únicos para un pozo de bombeo determinado,
- 2) no dependen de la magnitud del valor del gasto unitario seleccionado,
- 3) no dependen del estado inicial real del sistema acuífero,
- 4) no dependen del patrón de lluvia escogido para el pronóstico en el horizonte de planeamiento N,
- 5) para ambos tratamientos de la frontera de descarga, se obtuvieron los mismos valores numéricos.

MODELOS DE OPTIMIZACION

Debido a la necesidad de mantener el acuífero con niveles piezométricos deprimidos para que pueda asimilar grandes volúmenes de agua du-

rante eventos extraordinarios, se estudiaron los modelos siguientes:

Variante 1

Uno de los objetivos fue maximizar la extracción o bombeo de los campos de pozos en estudio durante un horizonte de planeamiento de cinco años divididos en semestres sujeto a un conjunto de restricciones de la capacidad o posibilidad física del sistema y de las demandas de agua.

$$\text{Función Objetivo: maximizar } Z = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N Q(j, i)$$

durante el período húmedo prolongado (P.H.P) donde $Q(j, i)$ es el bombeo o extracción del campo de pozos j durante el período de tiempo i, sujeta a las siguientes restricciones:

- 1) la demanda solicitada de 145 $\text{hm}^3/\text{año}$, desglosada en 70 y 75 hm^3/sem deben ser satisfechas, es decir,

$$\sum_{j=1}^M Q(j, i) \geq 70 \text{ para } i=2n-1, n=1,2, \dots, N/2$$

$$\sum_{j=1}^M Q(j, i) \geq 75 \text{ para } i=2n, n=1,2, \dots, N/2$$

Se obtuvieron 10 restricciones de demandas.

- 2) Los límites inferiores (Q_{\min}) y superiores (Q_{\max}) de explotación o bombeo en cada campo de pozos, que son constantes para todos los semestres, es decir,

$$Q_{\min}(j) \leq Q(j, i) \leq Q_{\max}(j) \text{ para } j=1, \dots, M \text{ y } i=1, \dots, N$$

La capacidad máxima instalada en cada nodo o campo de pozos (Q_{\max}) se deduce de la información disponible sobre los pozos de bombeo y en la descarga mínima por nodo (Q_{\min}) se fijó el valor de la demanda mínima histórica realmente extraída. Estos representaron 280 restricciones de explotación.

- 3) Para evitar excesivos descensos hicimos

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \beta(K, j, N-i+1) Q(j, i) \leq S_{\max}(k),$$

para $K = 1, \dots, M$,

donde $S_{\max}(K)$ es el abatimiento máximo permisible en el campo de pozos K, los cuales se obtuvieron mediante la diferencia de los estados iniciales simulados del acuífero (con lluvia solamente y cero explotación), h_k^0 , antes mencionados y la cota piezométrica mínima, h_k^c , deducida de la información obtenida sobre los pozos de bombeo, es decir, $S_{\max}(K) = h_k^0 - h_k^c$. En su conjunto constituyeron 14 restricciones del problema.

En general el problema de programación lineal tiene las siguientes dimensiones: 140 variables de decisión y 304 restricciones.

Los datos en detalle sobre los conjuntos de restricciones 2) y 3) antes mencionados, pueden observarse, para esta variante 1, y las demás que posteriormente trataremos, en la tabla 2.

Para resolver las tres variantes que se estudiaron se utilizó el paquete de programas SOL, el cual brinda facilidades para resolver problemas de programación lineal en microcomputadoras personales. El método utilizado es el simplex revisado, con la forma producto de la inversa y reinversión periódica.

El sistema integrado permite editar y resolver problemas de hasta 1.000 restricciones y 1.500 variables, requiere una IBM PC, modelo XT o AT o compatible con 256 K o más de memoria interna, y con tarjeta gráfica CGA o monocromática. Está programado en Turbo Pascal 5 con diseño modular.

Como resultado de este modelo se obtiene un valor máximo de la función objetivo de 995,76 hm^3 durante el período húmedo prolongado de cinco años. Este valor es muy superior a la demanda en ese período histórico, de media anual de 145 hm^3 , o sea, de un balance total de 725,0 hm^3 .

La distribución anual de bombeo obtenida es:

Año	Periodo	Explotación global hm^3
1	5/1941 - 4/1942	230,70
2	5/1942 - 4/1943	230,70
3	5/1943 - 4/1944	226,01
4	5/1944 - 4/1945	159,14
5	5/1945 - 4/1946	149,21

El proyecto técnico orienta mantener el acuífero bajo niveles piezométricos deprimidos y deduce

que es posible extraer hasta 230 $\text{hm}^3/\text{año}$ en el acuífero durante este mismo período histórico funcionando el sistema de drenaje en el aeropuerto y 208 $\text{hm}^3/\text{año}$ sin considerar este sistema, teniendo como base solamente el modelo de simulación AQUIMPE. De este estudio se deriva el proyecto de un nuevo acueducto que explote adicionalmente de la laguna Ariguanabo un gasto de 2,15 m^3/s durante todo el año (68 $\text{hm}^3/\text{año}$), ubicado en los nodos 44 y 47. Esta es la razón de por qué en estos nodos la explotación máxima dada en la tabla 2, es tan diferente y mayor a la de los restantes nodos.

De lo anterior se concluye que los resultados obtenidos de esta variante concuerdan extraordinariamente con los valores aportados de la modelación matemática del acuífero, considerando sólo el modelo de simulación regional del agua subterránea en la investigación.

Variante 2

Otro de los objetivos fue maximizar la extracción o bombeo de los campos de pozos en estudio durante un período seco prolongado (P.S.P.) de cinco años divididos en semestres.

Se mantienen la misma función objetivo de la Variante 1 y el mismo conjunto de restricciones (2) debido a los límites de bombeo. De la misma forma a la variante 1 se calcula el abatimiento máximo para la variante 2 (ver tabla 2), mientras la demanda solicitada de 50 $\text{hm}^3/\text{año}$ queda desglosada en 25 hm^3/sem , es decir,

$$\sum_{j=1}^M Q(j, i) \geq 25 \text{ para } i = 1, \dots, N$$

Como solución de esta variante se obtiene un valor máximo de 276,01 hm^3 de la función objetivo en el período seco de cinco años. La distribución anual de la explotación global en el acuífero de 53,78 hm^3 en los primeros cuatro años y 60,89 hm^3 en el último, es decir:

Año	Periodo	Explotación global hm^3
1	5/1961 - 4/1962	53,78
2	5/1962 - 4/1963	53,78
3	5/1963 - 4/1964	53,78
4	5/1964 - 4/1965	53,78
5	5/1965 - 4/1966	60,89

El valor obtenido en los primeros años coincide con la suma de la explotación mínima de los 14 nodos, ver tabla 2, que fue el valor mínimo global extraído realmente en ese período histórico 1961-1966.

El proyecto técnico no admite en este período seco prolongado ninguna explotación adicional del acueducto propuesto (en los nodos 44 y 47) porque el acuífero se agota y orienta que el volumen total de extracción, en períodos similares muy secos, no debe ser mayor que 69 hm³/año para mantener los niveles piezométricos deprimidos en el acuífero sin ser excedidas las cotas mínimas, h_K^c, en cada nodo.

De lo anterior se concluye que los resultados obtenidos de esta variante concuerdan mucho con la extracción real que el acuífero permitió obtener, y por otro lado, se verifican también los valores suministrados al modelo de optimización de las cotas mínimas, h_K^c, y explotación mínima de cada nodo.

Variante 3

Esta variante logra obtener el patrón de explotación adecuado que satisface la demanda solicitada con la menor depresión del sistema acuífero.

$$\text{Función objetivo: Min } S = \sum_{K=1}^M S(K, N) \text{ durante}$$

el P.H.P sujeta a los mismos conjuntos de restricciones de la Variante 1 (ver tabla 2).

Se obtiene un valor mínimo de 715,22 m de la función objetivo en el período extremo lluvioso de cinco años.

Presentamos un año intermedio para ilustrar los resultados de la explotación semestral obtenida, en hm³/sem para los períodos hidrológicos húmedos (P.H.) y secos (P.S.) en que se divide el año, en el horizonte de planeamiento:

Nodo	Explotación	
	P.H.	P.S.
15	1,06	1,06
21	1,84	0,56
22	1,44	0,77
44	4,32	2,10
47	0,00	9,17
49	2,50	2,50
69	9,71	9,71
70	10,13	10,13
74	3,45	3,45
75	3,58	3,58
79	4,37	4,37
99	1,98	1,98
104	2,52	2,52
108	23,10	23,10

TABLA 2
Información de entrada al modelo de técnicas de optimización

Campo de pozos N.º	Nodo	Cota mínima h _K ^c (m)	Estado inicial simulado h _K ^o (m)		Abatimiento máximo S _{max} (K) (m)		Límites de explotación hm ³ /sem		
			P.H.P.	P.S.P.	P.H.P.	P.S.P.	Q MAX	Q MIN	
1	15	54,0	157,30	76,35	103,30	22,35	1,06	0,61	
2	21	48,0	145,19	71,49	97,19	23,49	1,84	0,56	
3	22	48,0	144,91	71,40	96,91	23,40	1,44	0,77	
4	44	48,0	143,30	71,10	95,30	23,10	37,00	2,10	
5	47	48,0	142,12	70,91	94,12	22,91	35,00	0,00	
6	49	40,0	147,96	72,73	107,96	32,73	2,80	2,50	
7	69	46,0	128,76	68,79	82,76	22,79	9,71	4,46	
8	70	46,0	131,16	69,20	85,16	23,20	10,13	4,21	
9	74	46,0	122,95	67,74	76,95	21,74	3,45	1,55	
10	75	46,0	124,23	67,98	78,23	21,98	3,58	1,76	
11	79	46,0	116,86	66,49	70,86	20,49	4,37	3,40	
12	99	40,0	87,91	57,13	47,81	17,13	1,98	1,30	
13	104	40,0	83,87	55,61	43,87	15,61	2,52	1,73	
14	108	40,0	80,26	53,83	40,26	13,83	23,10	1,94	
TOTAL							137,98	26,89	

Compare estos resultados con los valores extremos de explotación, máximos y mínimos de la tabla 2. Obsérvese cómo se protege a los nodos 21, 22 y 49, donde se toman los valores mínimos de explotación, no así en los nodos 15, 69, 70, 74, 75, 79, 99, 104 y 108 en donde se eligen los valores máximos. En los nodos 44 y 47, acueducto propuesto, se eligen valores intermedios de los rangos de explotación especificados.

CONCLUSIONES

De los resultados de este trabajo concluimos que:

- 1) Se realiza una investigación de las funciones respuesta en donde queda clara y bien definida la interpretación y proceso a seguir en la determinación de estas funciones y especialmente β. Del análisis se demuestra que estos coeficientes no dependen de:
 - a) magnitud del valor del gasto unitario seleccionado Q_u,
 - b) estado inicial real del sistema acuífero,
 - c) patrón de lluvia pronóstico adoptado en el horizonte de planeamiento.
 - d) valores asignados a los contornos abiertos del acuífero.
- 2) Recomendamos una metodología para confeccionar el plan de uso del agua subterránea (P.U.A.) fundamentada en las funciones respuesta y en un modelo de técnicas de optimización, en donde se precisa el esquema de desarrollo óptimo en los campos de pozos durante un horizonte de planeamiento de varios años.

Puede resultar de mucho interés en una próxima etapa de esta investigación, incorporar el concepto de Función Valor Hiperanual de J. B. Martínez en la operación y administración de las aguas en un acuífero.
- 3) También estimamos que puede resultar de mucho valor, en etapas futuras, crear un paquete de programas de administración óptima de un acuífero a partir de la fusión

armónica de los paquetes de programas de simulación y de técnicas de optimización, donde se ejecute la metodología del plan del uso del agua propuesta aquí a través de una vía computacional eficiente.

- 4) Las variantes aplicadas al acuífero Ariguanabo confirman los resultados importantes obtenidos en el proyecto técnico, en relación con la explotación global a extraer en el acuífero, en períodos prolongados húmedos y secos, para mantener el acuífero bajo niveles piezométricos deprimidos tal como se orientó en ese trabajo.

REFERENCIAS

MADDOCK III, T. (1972): *Algebraic Technological Function from a Simulation Model*, Water Resources Research, vol. 8, núm. 1.

CHAVEZ RODRIGUEZ, A., y otros (1988): *Modelación digital y optimización matemática en el manejo de acuíferos regionales: un ejemplo de aplicación*. Memorias del 10.º Congreso Nacional de Hidráulica. Asociación Mexicana de Hidráulica A. C.

DILLA SALVADOR, F., y otros (1988): *Modelación matemática del acuífero Ariguanabo. Etapa final*. Proyecto técnico. Empresa Hidroeconomía Habana, C. de La Habana.

DURAUZA BELLVER, A. (1985): *Estimación de la evapotranspiración potencial por el método de Penman*. Programa de computación EVABAL. Instituto de Hidroeconomía, C. de La Habana.

GARCIA FERNANDEZ, L., y BARROSO DIAZ, M. A. (1990): *SOL. Manual del Usuario*. ICIMAF. Editorial Academia, C. de La Habana.

MARTINEZ RODRIGUEZ, J. B. (1988): *Modelación matemática de cuencas subterráneas: flujo impermanente bidimensional*. Monografía, Ingeniería Hidráulica, ISPJAR.

MARTINEZ RODRIGUEZ, J. B. (1977): *La optimización de la operación a corto plazo de sistemas hidráulicos existentes*. Tesis de candidatura, ISPJAE, C. de La Habana.

YAZICIGIL, H.; AL-LAYLA RASHID, I., y DE YONG, R. L. (1987): *Optimal Management of a Regional Aquifer in Eastern Saudi Arabia*, Water Resources Bulletin, American Resources Association, vol. 23, núm. 3.

WANAKULE, N.; MAYS, L. W., y LASDON, L. S. (1985): *Development and testing of a model for determining optimal pumping and recharge of large-scale aquifers*. Technical Report. CRWR-217.

Original recibido: Noviembre de 1993.
Original aceptado Mayo de 1994.

GEOQUIMICA

Estudio comparativo de la determinación de Al, Pb, Co y Ni en aguas residuales y naturales por AAS e ICP-AES.

Por P. DE LA FUENTE, E. ALONSO (*), M. A. QUIJANO, A. VERGARA y M. PALENZUELA

RESUMEN

Al, Pb, Co y Ni son analizados en aguas sembradas, tanto naturales como de vertidos, por Espectroscopía de Emisión Óptica-Plasma de Acoplamiento Inductivo sin adiciones estándar ni correcciones por interferencias de matriz. Los resultados obtenidos para cinco muestras naturales y de vertidos se comparan con los obtenidos por Espectrofotometría de Absorción Atómica con llama. La sensibilidad para las concentraciones más bajas de Pb y Co mediante ICP-AES es mayor que la que se consigue por FAAS. Los resultados de ICP-AES en general concuerdan bien con los obtenidos mediante FAAS consiguiendo mejor reproducibilidad.

Palabras clave: Estudio comparativo, Al, Pb, Co, Ni, AAS, ICP-AES.

ABSTRACT

It has been showed that Al, Pb, Co and Ni can be analyzed in spiked wastewater and natural water by ICP-AES neither standard addition nor matrix interferences corrections. The results obtained for five wastewater and five natural water samples are compared with those found by FAAS. The sensitivity with ICP-AES for lowest Pb and Co concentrations are better than those achieved with FAAS. Further more ICP-AES results in general match those obtained with FAAS, getting a better reproducibility.

Key words: Comparative study, Al, Pb, Co, Ni, FAAS, ICP-AES.

INTRODUCCION

Día a día crece el número de industrias que vierten indiscriminadamente sus residuos a las aguas superficiales, deteriorando su calidad.

Hay un gran número de elementos cuyo estudio es básico considerando la gran variedad de productos empleados en la industria, siendo importante conocer el impacto que causan en el medio ambiente. Para controlar la contaminación de las aguas superficiales se necesitan métodos de análisis sensibles y precisos. Se considera interesante también que los métodos sean direc-

tos, automáticos y rápidos, sin necesidad de preconcentración ni separación de matriz y libres de interferencias en un amplio rango de concentración de las especies concomitantes.

En nuestro laboratorio se analizan aguas de vertidos con el fin de estudiar su capacidad de contaminación medioambiental. En la determinación de metales por AAS, la mayoría no presentan problemas, pero otros pueden dar lugar a errores asociados con la proximidad de las líneas de máxima sensibilidad o con interferencias de matriz. Esto nos lleva a estudiar el empleo de las técnicas de espectrometría de plasma pues prácticamente no presentan interferencias de matriz y añaden la posibilidad de determinaciones mul-

tielmentales con la consiguiente disminución del tiempo de análisis, factor a tener en cuenta en un laboratorio que maneja gran cantidad de muestras. Con este fin continuamos un estudio iniciado en 1988 (1), desarrollando ahora el estudio comparativo de la determinación de Al, Pb, Co y Ni por FAAS e ICP-AES. Los elementos analizados forman parte normalmente de gran cantidad de productos usados en la industria y por ello están presentes en la mayoría de las aguas de vertidos.

El Al es el metal más abundante de la Tierra. Se encuentra en aguas naturales debido al contacto con rocas, suelos y arcillas, y en industria se emplea mucho en procesos de clarificación de aguas.

El Pb se encuentra en concentraciones bajas en aguas naturales debido a su tendencia a ser precipitado por gran número de sustancias. Su presencia en el agua es normalmente un índice de intrusión de residuos mineros o industriales.

El Co y el Ni se encuentran raramente en las aguas naturales; generalmente están asociados a aguas residuales industriales.

Los intervalos de concentración estudiados han sido escogidos considerando la toxicidad en los metales y su concentración recomendada en aguas de vertidos. El estudio se amplía a la determinación de dichos metales en aguas naturales pues la mayoría de las aguas procedentes de industrias son vertidas a ellas.

Se han propuesto diversos métodos para el análisis de aguas de río, minerales y de mar por ICP-AES con preconcentraciones (2,3), usando adiciones estándar para corregir interferencias multiplicativas en presencia de una matriz (4). Nosotros no usamos ni preconcentración ni adiciones estándar, pues mejorarían las prestaciones del método pero a costa de aumentar el tiempo de análisis. Con el análisis directo hemos alcanzado suficiente sensibilidad para la determinación de Al, Pb, Co y Ni en este tipo de muestras.

PARTE EXPERIMENTAL

1. Generalidades

Reactivos empleados: HNO₃ Merck Suprapur. Patrones certificados de 1.000 mg/l de Al, Pb, Co

y Ni. K 0,1 % (p/v), preparado a partir de KCl comercial en agua destilada.

Muestras de aguas de vertidos industriales, con conductividad 4.700-10.400 μS/cm, y oxidabilidad al KMnO₄ 3,5-15,5 mg O₂/l.

Muestras de aguas naturales, con conductividad 100-1.000 μS/cm, y oxidabilidad al KMnO₄ 0,4-1,5 mg O₂/l. Las concentraciones de Al, Pb, Co y Ni en estas muestras son inferiores a la décima parte del límite más bajo del intervalo de concentraciones estudiado.

Todas las muestras se conservan con HNO₃ 0,5 % (v/v), refrigeradas a 4° C.

Siembra de las muestras: cinco muestras de 200 ml de agua residual y cinco muestras de 200 ml de aguas naturales se siembran con concentraciones de cada elemento comprendidas en los siguientes intervalos: Al (1-10 mg/l), Pb (20-200 μg/l), Co (20-200 μg/l) y Ni (0,2-2 mg/l).

2. Espectrofotometría de AA con llama

Instrumentación: Espectrofotómetro IL 951 (Instrumentation Laboratory, Wilmington, MA, USA).

Procedimiento: el espectrofotómetro se calibra con series de cinco soluciones estándar por cada elemento, preparadas a partir de soluciones estándar certificadas de 1.000 mg/l. Todo el material de vidrio empleado ha sido lavado y conservado en una solución de HNO₃ 10 % (v/v). Ningún elemento necesita tratamiento previo excepto Al, que en la llama de óxido nitroso/acetileno se ioniza parcialmente; para evitarlo se adiciona K 0,1 % (p/v) tanto en muestras como en patrones.

Las longitudes de onda seleccionadas para cada elemento aparecen en la tabla 1.

TABLA 1
Longitudes de onda para FAAS e ICP-AES

Elemento	FAAS		ICP-AES		
	λ (nm)	BW (nm)	λ (nm)	orden n°	Slit (μm)
Al	309.3	1.0	237.31	2	25
Pb	217.0	1.0	220.35	2	25
Co	240.7	0.3	228.62	2	25
Ni	232.0	0.15	231.60	2	25

(*) Departamento de Química Analítica, Universidad de La Coruña. La Zapateira, s/n. 15071 La Coruña.

3. Espectrometría ICP

Instrumentación: Espectrómetro de Emisión de Plasma ICAP-61 de la firma Jarrell-Ash, equipado con 30 canales que permiten la determinación simultánea de 30 elementos.

Procedimiento: el espectrómetro se calibra con tres patrones multielementales de diferentes concentraciones. Se ha empleado corrección de fondo. Se han seleccionado las líneas de emisión más sensibles libres de interferencias espectrales (tabla 1), excepto para Al, ya que nuestro equipo de ICP está programado para análisis de prospección geoquímica y tiene longitudes de onda prefijadas. A pesar de que 309,3 nm no es la línea de máxima sensibilidad para Al, se comprueba que es suficiente para detectar las concentraciones más bajas presentes en las muestras.

No hemos usado patrón interno ya que no existen interferencias físicas significativas que puedan afectar a los resultados. No ha sido necesario realizar adiciones estándar pues el análisis directo ofrece una buena precisión.

RESULTADOS Y DISCUSION

Un método para la determinación de un analito particular se puede probar aplicándolo a series de muestras ya analizadas por un método fiable. Para determinar si el método ICP-AES puede ser usado por nuestro laboratorio se confronta con el método de FAAS.

Cuando el análisis se repite varias veces en un intervalo de concentración pequeño, se puede hacer la comparación usando distintos tests estadísticos (Test de Fisher (5), test t de Student con datos apareados (6)). Estos procedimientos no son apropiados para intervalos de concentración grandes. Cuando se comparan dos métodos a diferentes concentraciones, es más conveniente el empleo del análisis de regresión. Se usa una variable para los resultados obtenidos aplicando el método de comparación a las mismas muestras.

Si cada muestra ofrece resultados idénticos con ambos métodos analíticos, la recta de regresión tendrá origen en cero y pendiente y coeficiente de correlación de 1. Las desviaciones de esta si-

tuación ideal se pueden probar determinando los límites de confianza para la pendiente y el origen (6).

En las tablas 2-5 se muestran los resultados obtenidos para Al, Pb, Co y Ni en las muestras sembradas. En las figuras 1-4 se representan las rectas de regresión, asignando a los resultados de FAAS el eje x y a los de ICP-AES el eje y.

Los valores para la pendiente (b), el origen (a), el coeficiente de correlación (r) y los límites de confianza para la pendiente y el origen se calculan usando métodos habituales (6). Los resultados se presentan en la tabla 6.

En todos los casos la concordancia es satisfactoria. La pendiente y el origen no difieren significativamente de 1 y 0 respectivamente, por lo tanto no hay evidencia de errores sistemáticos entre las dos series de resultados.

De las tablas 2-5 se deduce que la concordancia

TABLA 2
Concentración de aluminio en aguas sembradas, naturales y de vertidos

Muestra	aguas de vertidos				aguas naturales			
	FAAS		ICP-AES		FAAS		ICP-AES	
	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)
1	9.83	0.13	10.24	0.02	9.64	0.22	10.49	0.03
2	8.04	0.07	8.88	0.15	8.21	0.08	9.07	0.06
3	5.42	0.12	5.62	0.02	5.48	0.09	5.66	0.03
4	2.37	0.11	2.67	0.01	2.32	0.08	2.45	0.01
5	0.90	0.05	0.05	0.94	0.91	0.03	0.98	0.01

Media aritmética de las concentraciones de Al, en mg/l, obtenidas por FAAS e ICP-AES (n=5).

TABLA 3
Concentración de plomo en aguas sembradas, naturales y de vertidos

Muestra	aguas de vertidos				aguas naturales			
	FAAS		ICP-AES		FAAS		ICP-AES	
	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)
1	--	--	0.035	0.001	--	--	0.035	0.002
2	--	--	0.068	0.004	--	--	0.046	0.002
3	0.10	0.02	0.100	0.007	0.12	0.01	0.123	0.003
4	0.16	0.03	0.170	0.004	0.15	0.02	0.156	0.004
5	0.21	0.02	0.206	0.008	0.21	0.02	0.210	0.007

Media aritmética de las concentraciones de Pb, en μ g/l, obtenidas por FAAS e ICP-AES (n=5).

TABLA 4
Concentración de cobalto en aguas sembradas, naturales y de vertidos

Muestra	aguas de vertidos				aguas naturales			
	FAAS		ICP-AES		FAAS		ICP-AES	
	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)
1	--	--	0.025	0.002	--	--	0.025	0.001
2	0.06	0.01	0.054	0.002	0.12	0.02	0.054	0.001
3	0.11	0.01	0.109	0.001	0.11	0.01	0.111	0.001
4	0.16	0.01	0.156	0.001	0.15	0.02	0.156	0.001
5	0.21	0.01	0.198	0.002	0.20	0.02	0.193	0.001

Media aritmética de las concentraciones de Co, en μ g/l, obtenidas por FAAS e ICP-AES (n=5).

TABLA 5
Concentración de níquel en aguas sembradas, naturales y de vertidos

Muestra	aguas de vertidos				aguas naturales			
	FAAS		ICP-AES		FAAS		ICP-AES	
	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)	\bar{x}	s (R)
1	2.08	0.05	2.190	0.010	2.12	0.02	2.135	0.006
2	1.58	0.02	1.590	0.020	1.59	0.05	1.604	0.010
3	1.01	0.03	1.034	0.006	1.06	0.01	1.085	0.004
4	0.57	0.01	0.515	0.006	0.53	0.01	0.578	0.003
5	0.22	0.01	0.221	0.004	0.21	0.01	0.200	0.002

Media aritmética de las concentraciones de Ni, en mg/l, obtenidas por FAAS e ICP-AES (n=5).

TABLA 6
Comparación de resultados de ICP frente a FAAS
Rectas de regresión

Elemento	Pendiente	Origen	Coefic. Correl.
Al	1.077 \pm 0.019	(-0.020 \pm 0.124) mg/l	0.9986
Pb	0.982 \pm 0.050	(0.005 \pm 0.008) mg/l	0.9883
Co	0.948 \pm 0.044	(0.001 \pm 0.006) mg/l	0.9964
Ni	1.032 \pm 0.017	(-0.017 \pm 0.022) mg/l	0.9987

Pendiente y origen con límites de confianza del 95 por 100.

entre ICP-AES y FAAS es buena. En ambas series de muestras, excepto para Co, ICP-AES presenta sistemáticamente valores más altos que FAAS pero sin diferencias significativas. Esto se atribuye a los diferentes efectos de matriz que se presentan en ambos métodos.

Aluminio ICP-AES/FAAS

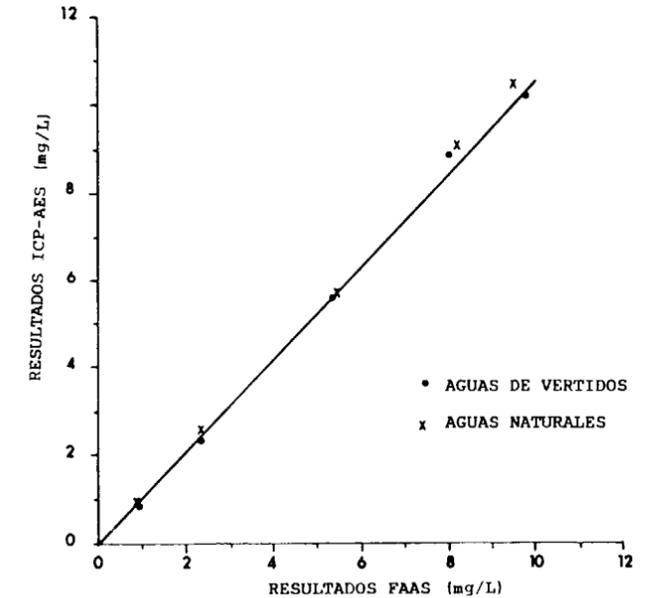


Figura 1.

Plomo ICP-AES/FAAS

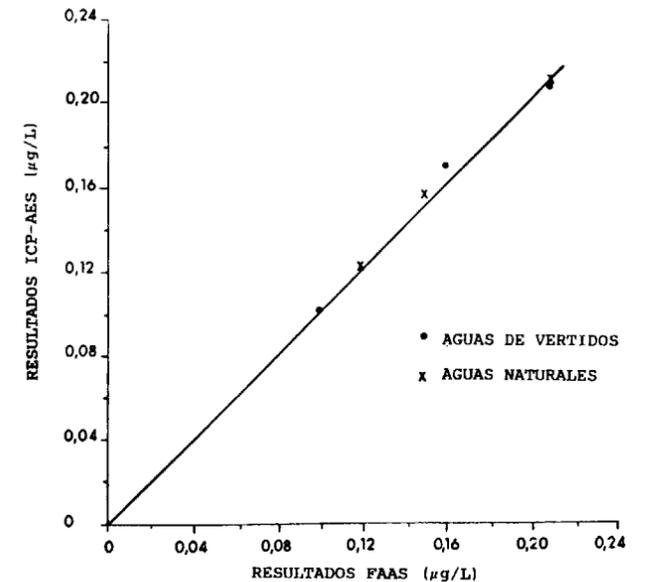


Figura 2.

Para Al y Ni ambos métodos presentan sensibilidad semejante. La menor sensibilidad que se muestra para Pb y Co con FAAS se puede atribuir a que las concentraciones más bajas de

Cobalto ICP-AES/FAAS

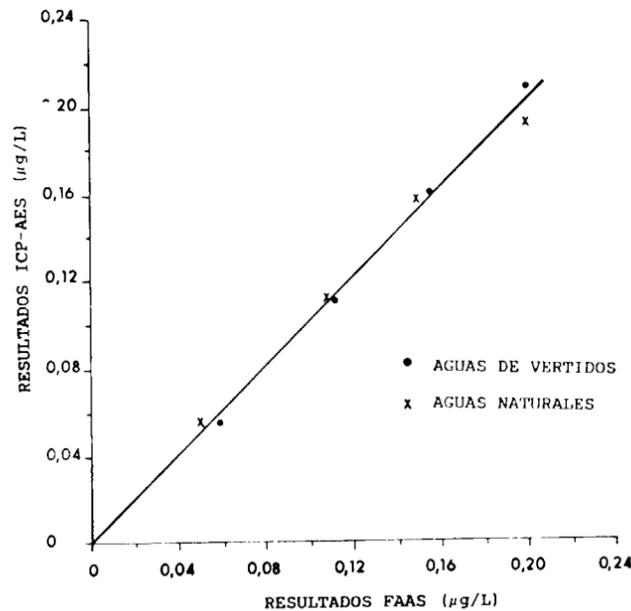


Figura 3.

Níquel ICP-AES/FAAS

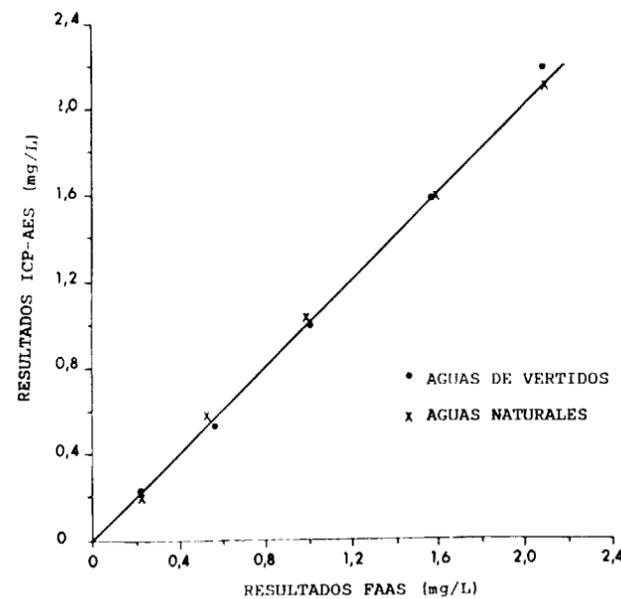


Figura 4.

estos elementos están próximas al límite de detección en las condiciones de medida empleadas, y como consecuencia la alta absorbancia de fondo distorsiona la señal analítica.

Los valores obtenidos para Pb, Co y Ni por ICP-AES presentan mayor reproductibilidad que con FAAS ya que las desviaciones estándar son menores. Para Al las desviaciones estándar y la reproductibilidad son similares con ambos métodos. En general las desviaciones estándar son mayores para las concentraciones más altas, lo que concuerda con la influencia de los efectos de matriz.

CONCLUSION

Se compara el método de ICP-AES sin corrección de adiciones estándar ni interferencias de matriz con FAAS. Se observa que en general la concordancia es satisfactoria, alcanzando en algunos casos mayor sensibilidad con ICP-AES que con FAAS. Se comprueba que ICP-AES ofrece rapidez, sensibilidad y reproductibilidad para las determinaciones de Al, Pb, Co y Ni en aguas de vertidos.

REFERENCIAS

- 1.—ALARCON, P.; ALONSO, E.; BENITO, Y.; VERGARA, A. (1989): *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 37, 75-82 (1989).
- 2.—VERMEIREN, K.; VANDECASTEELE, C.; DAMS, R. (1990): *Analyst*, 115, 17-22.
- 3.—BERNAN, S. S.; MCLAREN, J. W.; WILLIE, S. N. (1980): *Anal. Chem.*, 52, 488.
- 4.—VERMEIREN, K. A.; TAYLOR, P. D. P.; DAMS, R. J. (1988): *J. Anal. At. Spectrom.*, 3, 571.
- 5.—BERMEJO, F.; BERMEJO, A. (1981): *Los cálculos numéricos en la Química Analítica*. (Imprenta del Seminario Conciliar, Santiago de Compostela, España), 4.ª ed., 170-186.
- 6.—MILLER, J. C. (1984): *Statistics for Analytical Chemistry* (Ellis Horwood Ltd., Chichester, U. K.), 202.

Original recibido: Agosto de 1994.

Original aceptado: Septiembre de 1994.

Aplicación del proceso de imágenes al análisis de datos gravimétricos.

Por J. L. PLATA TORRES (*) y S. SOMOZA DIAZ-SARMIENTO (**)

RESUMEN

El proceso de imágenes digitales es una de las técnicas más innovadoras para el análisis de datos geofísicos. En este trabajo se obtienen imágenes a partir de datos irregularmente espaciados, como son los de gravimetría estructural. Con ellas se desarrolla una metodología para controlar la validez de la densidad de reducción utilizada en el cálculo de la anomalía de Bouguer. La superposición de tres imágenes, con los valores de la altimetría y de la anomalía de Bouguer calculada en dos densidades, de rango restringido y con aplicación de paletas de un solo tono, supone un método rápido y eficaz para la localización de anomalías de correlación topográfica. Otros ensayos realizados por superposición de imágenes de paleta completa, con imágenes vectoriales de la cartografía geológica, han demostrado que este tipo de proceso es una alternativa muy ventajosa a otras formas de estudio cualitativo de documentos geofísicos.

Palabras clave: Proceso de imágenes, Gravimetría, Densidad, Interpretación cualitativa.

ABSTRACT

Digital Image processing is one of the most recent techniques to analyze geophysical data. In this paper images are prepared from irregularly distributed gravity data, developing a new method for testing the validity of the density used in the reduction of the Bouguer anomaly. The superposition of three images, with altimetry and Bouguer anomaly at two different densities, of selected range and application of just one basic colour per image, has given the best results to locate topographic correlation anomalies. Other tests made with full pallet application images, together with geologic vector files, have shown to be a very good tool in the qualitative analysis of geophysical data.

Key words: Image processing, Gravity, Density, Qualitative interpretation.

INTRODUCCION

En este trabajo se desarrolla una metodología para utilizar la técnica de creación y proceso de imágenes en el control de parámetros de cálculo de anomalías gravimétricas, y en el análisis de mapas de anomalías geofísicas de campos potenciales.

El proceso de imágenes tiene por última finalidad hacer más fácil al ojo humano la captación de la información contenida en los datos.

Los elementos de partida para generar una imagen son, en nuestro caso, un conjunto de datos geofísicos irregularmente distribuidos, y con re-

lativamente baja cobertura de información, lo que supone la principal diferencia con la generación de imágenes típica, donde la información es adquirida en forma continua, formando una matriz de elementos adosados.

El interés de los objetivos propuestos en este trabajo, radica tanto en su aporte para iniciar la incorporación de una nueva metodología en un entorno específico, como por la novedad de la utilización que aquí se hace de imágenes de datos gravimétricos.

FORMACION DE LAS IMAGENES

La conversión de datos numéricos irregularmente espaciados, en imágenes, consta de dos etapas de transformación:

(*) Doctor Ingeniero de Minas. Instituto Tecnológico Geominero de España. Area de Geofísica.

(**) Ingeniero de Minas.

- conversión de los datos iniciales a una distribución en malla regular, para lo que hay que emplear algoritmos de interpolación,
- sustitución del valor numérico de cada nodo de la malla, por una codificación de color.

Para obtener imágenes con la calidad suficiente para que sea viable el uso de esta técnica, se requiere que cada nodo de la malla venga representado por un pixel de la pantalla del ordenador, o mejor, que existan varios nodos por pixel si van a efectuarse operaciones de ampliación de imagen; este requerimiento de la imagen es una diferencia fundamental con otros modos de representación de datos, suponiendo, además, un límite práctico a la hora de convertir un conjunto de datos en una imagen.

Existe una relación entre la distancia a la que se encuentran los datos, y el paso de malla al que pueden ser interpolados, de tal forma que se mantenga la información. Esta relación es una consecuencia del teorema del muestreo, por el que la mayor frecuencia (frecuencia de Nyquist) contenida en los datos viene determinada por el inverso del doble de la distancia entre ellos.

Pasar a malla regular empleando un paso de malla muy superior al derivado de esta frecuencia hace, evidentemente, perder información. Crear mallas con pasos muy inferiores a la distancia entre datos, es origen de la aparición de frecuencias realmente no presentes en las mediciones.

El método más adecuado para realizar una interpolación, depende de la distribución inicial de los datos; los mejores resultados para este trabajo se han obtenido, tras análisis de diferentes técnicas, interpolando los valores a malla regular tanto por aplicación de Kriging, como con métodos de *minima curvatura*.

Respecto a la codificación en colores, es preciso tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Los colores en la pantalla de un ordenador, se obtienen por mezcla de colores primarios aditivos, mientras que en las impresoras se emplean los primarios sustractivos. Por este motivo los resultados de un proceso de imágenes no son siempre transportables fielmente al papel, residiendo su mayor potencial en el análisis directo sobre la pantalla del ordenador.

- La utilización de más de 64 colores diferentes, no constituye una mejora significativa en este tipo de imágenes, ya que las diferencias no son percibidas por el ojo. Téngase en cuenta que aquí lo que se persigue es codificar una secuencia numérica.

- La asignación de colores puede hacerse distribuyendo el rango de valores numéricos en un cierto número de categorías, todas ellas de la misma longitud de intervalo, de forma lineal, o todas ellas con el mismo número de puntos: forma de histograma ecualizado. El empleo de uno u otro sistema depende de lo que se quiera hacer resaltar, dando mayor nivel de detalle la ecualización, donde el área ocupada por cualquier color es la misma.

Una vez conseguida la imagen, su proceso consiste en una serie de técnicas encaminadas a su modificación, para hacer más notable a la vista la información contenida. Las técnicas utilizadas en este trabajo son las siguientes:

- modificaciones en la paleta de colores,
- superposición de imágenes,
- creación de imágenes por aplicación de filtros direccionales o de sombras,
- eliminación de rangos de colores,
- redistribución de asignaciones de niveles.

Para los ensayos realizados en este trabajo se han utilizado datos del Banco de Datos Gravimétricos del ITGE, seleccionando un área de 2.261 kilómetros cuadrados, constituida por cuatro hojas del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000, pertenecientes a la Faja Pirítica, con un total de 10.010 estaciones gravimétricas (4,5 estaciones por kilómetro cuadrado), para las que se ha calculado la anomalía de Bouguer adoptando como densidad de reducción el valor de 2,6 g/cm³.

A partir de ficheros con valores X, Y, Z, siendo X, Y las coordenadas UTM de cada estación, y Z la cota topográfica o la anomalía de Bouguer en diversas densidades, se procedió a su conversión en malla regular, con paso de 250 m. Esta malla fue sometida a codificación en color obteniéndose las imágenes por asignación, según histograma ecualizado, de una paleta de 256 colores. En ellas, cada pixel representa, por tanto, un

cuadrado de 250 m de lado, y la imagen es de 239 × 153 pixels. Ejemplos de estas imágenes pueden verse en la figura 6.

APLICACION AL ANALISIS DE LA DENSIDAD DE REDUCCION

La primera aplicación que se ha llevado a cabo consiste en desarrollar un método que permita identificar, en toda el área prospectada, si la densidad de reducción adoptada para el cálculo de la anomalía de Bouguer es o no correcta.

Si la densidad empleada es inferior a la que debiera de utilizarse, se produce una correlación entre el relieve topográfico y las anomalías gravimétricas, de tal forma que máximos de gravedad se corresponden con altos topográficos y mínimos de gravedad, se corresponden con valles. La correlación inversa se da cuando la densidad elegida para los cálculos ha resultado ser superior a la debida.

Existen hoy en día una serie de métodos para determinar cual debe ser la densidad de reducción idónea. Algunos de éstos métodos se basan precisamente en la aludida correlación entre la anomalía de Bouguer y la topografía. Nuestro objetivo no es el formular un nuevo método de estimación de la densidad, sino proponer un método para verificar que una vez adoptada una densidad, ésta es o no correcta en toda el área prospectada. Esta duda surge sobre todo, cuando las zonas contempladas son muy extensas, ya que en ellas es más probable que existan cambios litológicos importantes y asociaciones de dichos cambios a estructuras geológicas que se manifiesten en accidentes topográficos.

En el manejo de grandes volúmenes de datos, es cuando, precisamente, puede resultar de especial utilidad el empleo de técnicas como el proceso de imágenes.

Para realizar el análisis de la correlación Bouguer-topografía mediante imágenes, se ha seguido un procedimiento deductivo, que queda reflejado en los diferentes ensayos emprendidos.

Se comenzó por el empleo de paletas monocromáticas, adjudicando colores primarios distintos a la imagen de la topografía y de la anomalía gravimétrica, esperando que los colores obteni-

dos mediante la técnica de superposición de imágenes, permitieran identificar las diferentes correlaciones. Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- Las paletas monocromáticas dan imágenes de poco detalle, aunque podría ser suficiente para una distinción entre máximos y mínimos.
- La superposición de colores primarios de distinta saturación, da lugar a imprecisiones: por ejemplo, el rojo de mínima saturación sobre verde saturado, produce verde de menor grado de saturación. La variación de saturación no es un factor fácilmente apreciable por el ojo humano, salvo casos extremos (fig. 1).

De las imágenes de superposición así obtenidas, pueden extraerse conclusiones, sobre todo por el color resultante de la combinación de primarios de máxima saturación (amarillo, en caso de emplear verde y rojo), aunque no son fáciles de analizar.

Una forma de evitar este efecto, es utilizar colores de un solo tono o grado de saturación, aunque de esta forma hay que realizar una separación previa de los valores máximos y mínimos. Para llevar a cabo este nuevo ensayo, se ha comenzado por utilizar imágenes de una zona más restringida (77 kilómetros cuadrados), con 59 estaciones gravimétricas por kilómetro cuadrado, en malla de 200 m de paso (fig. 2), para la que se utilizó una densidad de reducción de 2,6 g/cm³ en el cálculo de la anomalía de Bouguer, resultando evidente la aparición de alguna falsa anomalía. Las menores dimensiones de la zona hacen que la asignación en la imagen sea de varios pixels por nodo.

La separación de zonas de máximos y mínimos tanto de topografía como de anomalías gravimétricas se ha llevado a cabo por la técnica de eliminación de rangos de colores sobre las imágenes de paleta completa. Posteriormente se ha utilizado la asignación de paletas de un solo tono a cada imagen resultante: verde a la topografía y rojo a la gravimetría. Mediante superposición se han creado ocho imágenes:

- máximos de topografía con máximos de gravedad,
- máximos de topografía con mínimos de gravedad,

- mínimos de topografía con máximos de gravedad,
- mínimos de topografía con mínimos de gravedad,

para las anomalías de Bouguer, calculadas con las densidades 2,6 y 2,0 g/cm³, siendo la primera la asignada por criterios geológicos generales a esta zona y el inferior la más adecuada para la litología de los accidentes topográficos más relevantes en el área.

Del análisis de las imágenes así conseguidas es inmediata la deducción de qué áreas resultan probables de tener anomalías gravimétricas relacionadas con una densidad inadecuada, que serán aquellas en las que se superponen los colores asignados a la topografía y a la anomalía de gravedad. La delimitación de las zonas en que ciertamente la correlación se debe a la densidad de reducción, se realiza por comparación de las áreas de aparente correlación a distintas densidades: por ejemplo, si de una imagen perteneciente a la densidad 2,6 g/cm³ surge un área dada por el color de combinación, donde la densidad sería excesivamente alta (fig. 3a), pero dicha área resulta también correlacionada de densidad alta empleando una densidad de 2,0 g/cm³ (fig. 3b), la deducción lógica es que dicha correlación no se debe al uso de una u otra densidad. Lo contrario se establece cuando, al emplear otra densidad, desaparece, en efecto, toda o parte del área de correlación (área señalada con una flecha en la fig. 3a).

Esta conclusión, conduce por tanto a la fase final de este ensayo, formándose cuatro imágenes, en las que cada una resulta de la combinación de tres imágenes:

- máximos de topografía con mínimos de gravedad en dos densidades,
- mínimos de topografía con máximos de gravedad en dos densidades,

lo que permite deducir las áreas que contienen anomalías gravimétricas correlacionadas con la topografía, por resultar demasiado elevada la densidad mayor (fig. 4):

- máximos de topografía con máximos de gravedad en dos densidades,
- mínimos de topografía con mínimos de gravedad en dos densidades,

lo que permite deducir las áreas que contienen anomalías gravimétricas correlacionadas con la topografía, por resultar demasiado pequeña la densidad menor.

La identificación de zonas donde la densidad elegida puede no ser correcta, resulta inmediata, al ser las del color resultante de la superposición de los primarios asignados a la topografía y a la anomalía de Bouguer de la densidad mayor y menor respectivamente.

Puesto que el método desarrollado permite deducir, utilizando mapas de anomalías calculadas en dos densidades, las zonas donde la densidad mayor puede ser demasiado alta y donde la densidad inferior puede ser demasiado pequeña, el análisis completo debe realizarse a partir del mapa de Bouguer a la densidad que quiere verificarse, junto con otros dos, uno en densidad mayor y otro en densidad menor. Para ello se han obtenido las imágenes gravimétricas en densidad 2,8 g/cm³ y se ha realizado su comparación con las imágenes en densidad 2,6 g/cm³, deduciéndose así las zonas donde esta densidad puede ser demasiado baja.

Un ejemplo del resultado obtenido por aplicación del método a la zona completa se encuentra en la figura 5, donde se destacan con una flecha las áreas en las que la densidad 2,6 resulta demasiado baja, al producirse anomalías positivas correlacionadas con altos topográficos, mientras que esta correlación desaparece al emplear una densidad de 2,8. En la figura 6 se han superpuesto las áreas de anomalías dudosas según los criterios de densidad anteriormente expuestos, a la topografía y mapas de Bouguer, lo que permite apreciar una exacta correspondencia de las áreas detectadas con los accidentes topográficos netos y anomalías individualizadas. Esto supone una prueba de la validez del método de deducción empleado.

Las zonas así detectadas son las que en las sucesivas etapas de interpretación, deben considerarse como de posibles falsas anomalías, y para su estudio será preciso tener en cuenta los mapas construidos a otras densidades.

Se presenta sin embargo, una cierta ambigüedad debido al criterio aplicado para separar en los mapas lo que se considera zonas de máximos y zonas de mínimos. Una forma más objetiva de

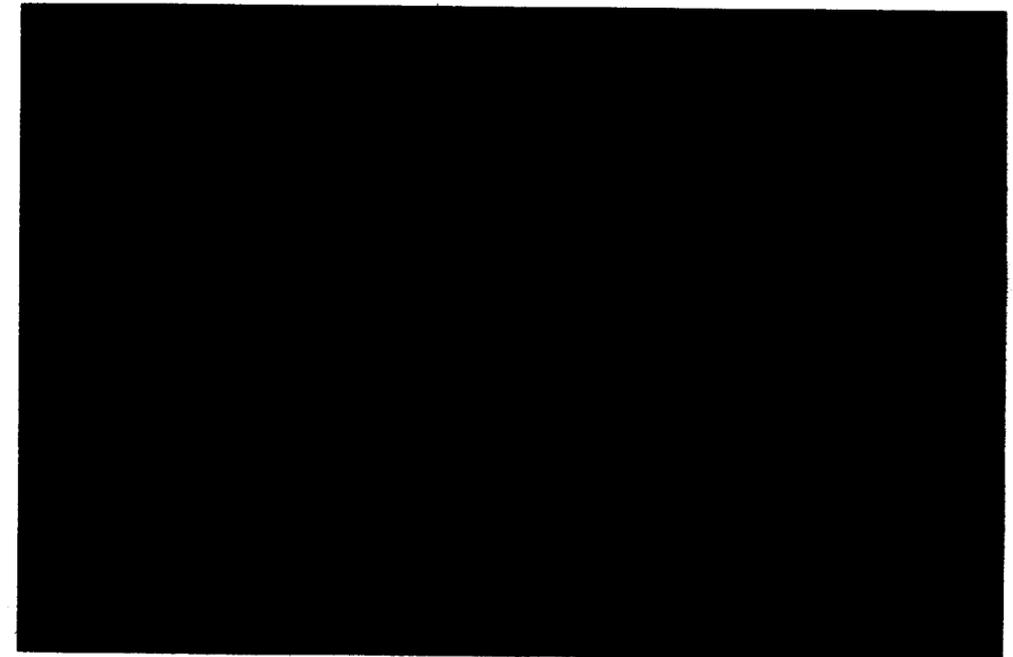


Fig. 1.- Imagen obtenida por superposición de dos imágenes de paleta monocromática: verde para la topografía y rojo para la anomalía de Bouguer. La correlación entre ambos valores por el color de combinación, solo resulta evidente para los valores máximos (color amarillo). La imagen no es fácilmente analizable.

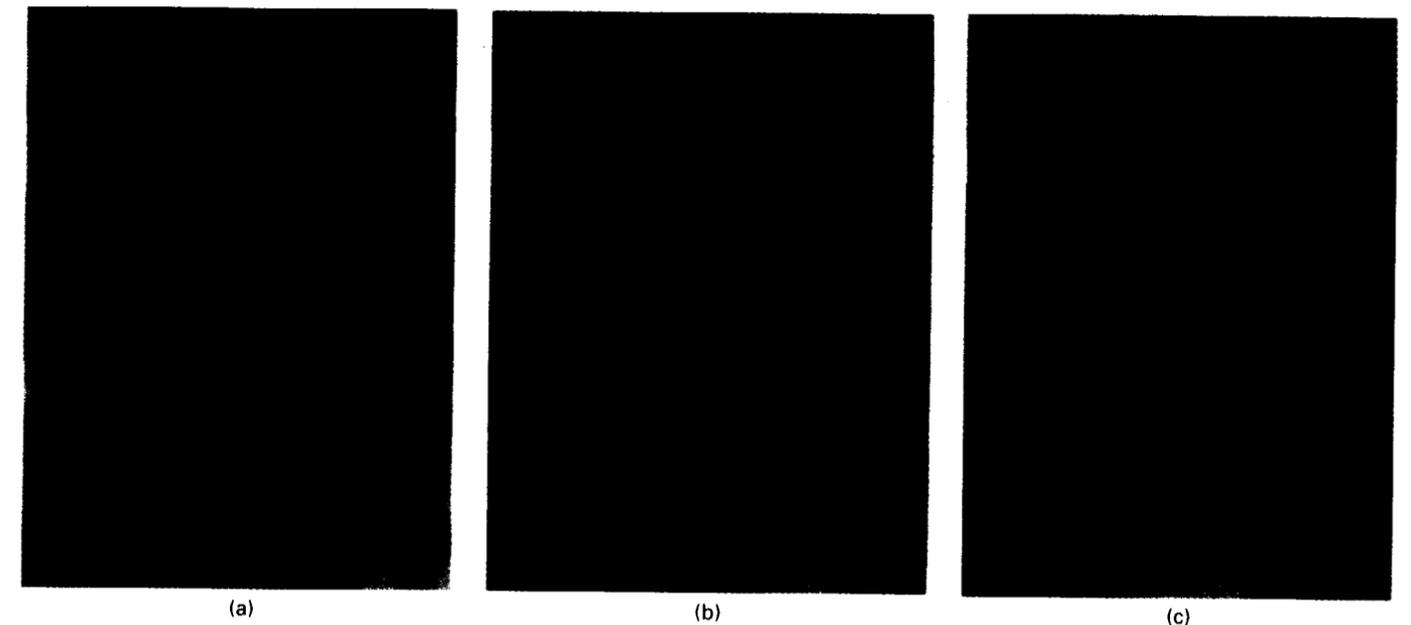


Fig. 2.- Imágenes de paleta completa para la topografía (a), anomalía de Bouguer en 2,6 g/cm³ (b) y 2,0 g/cm³ (c). La flecha indica la aparición de una falsa anomalía por correlación con la topografía, al utilizar 2,6 g/cm³

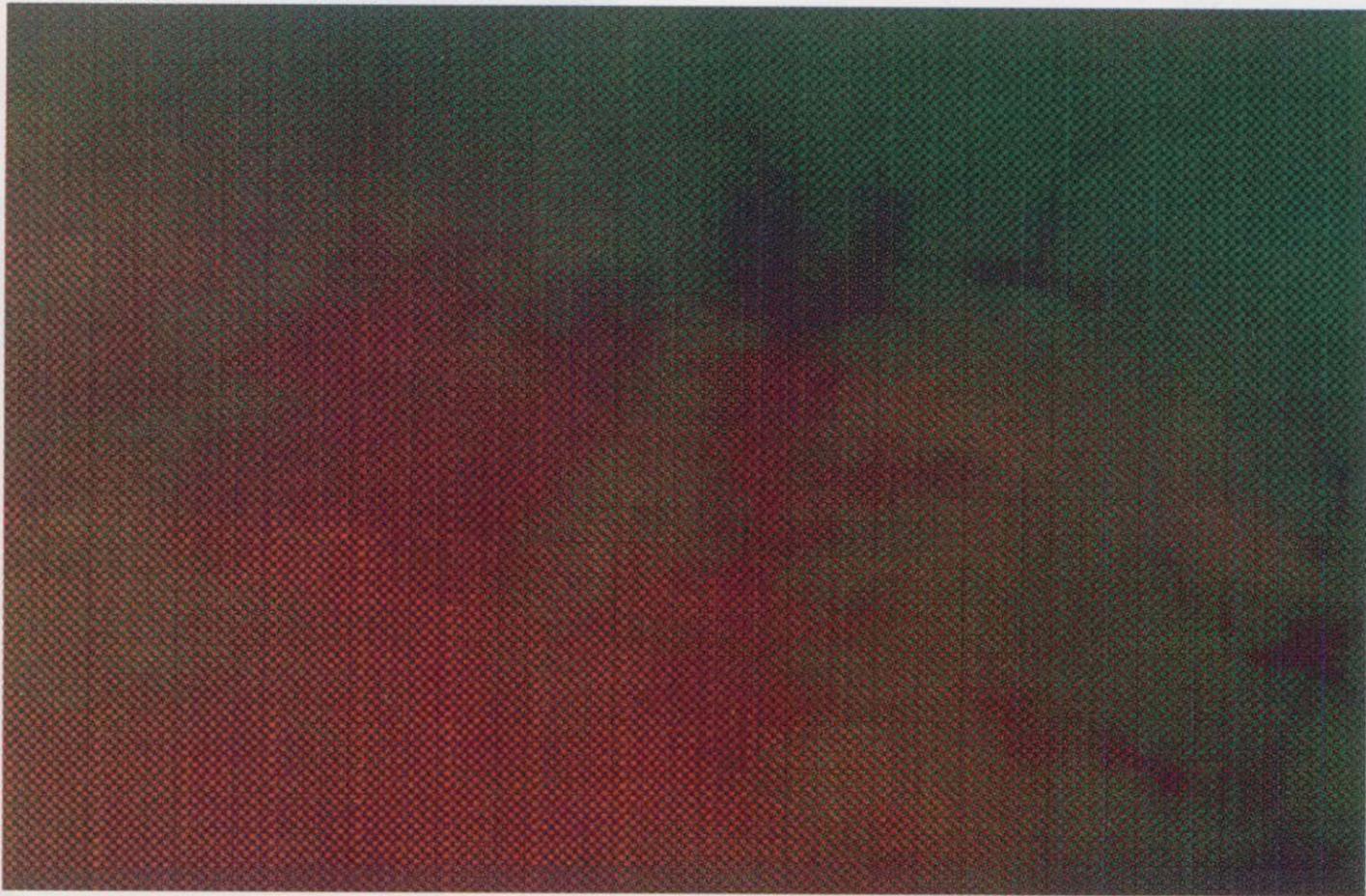
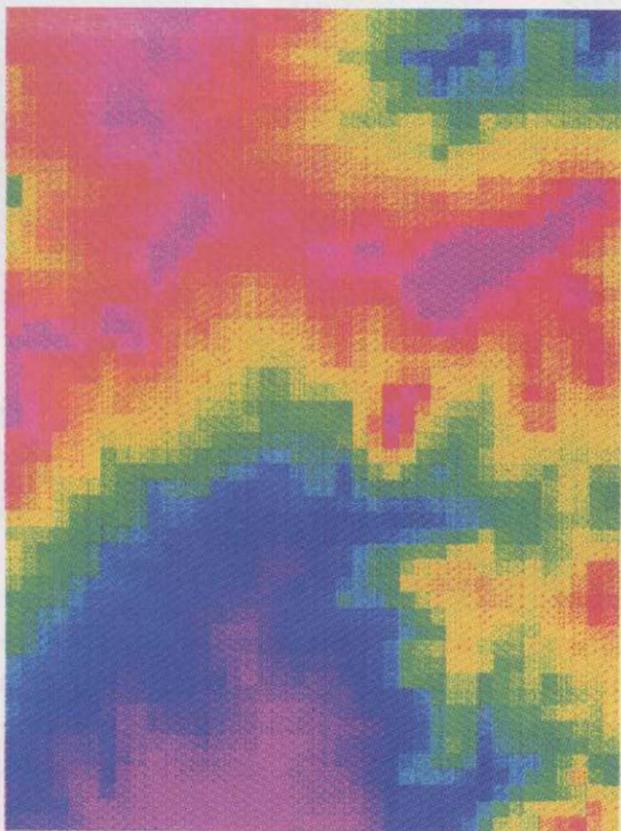
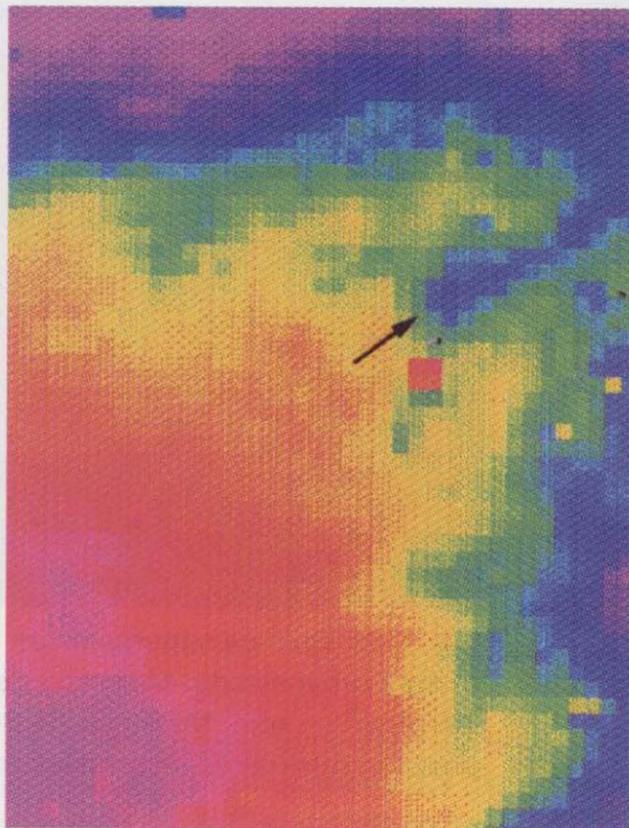


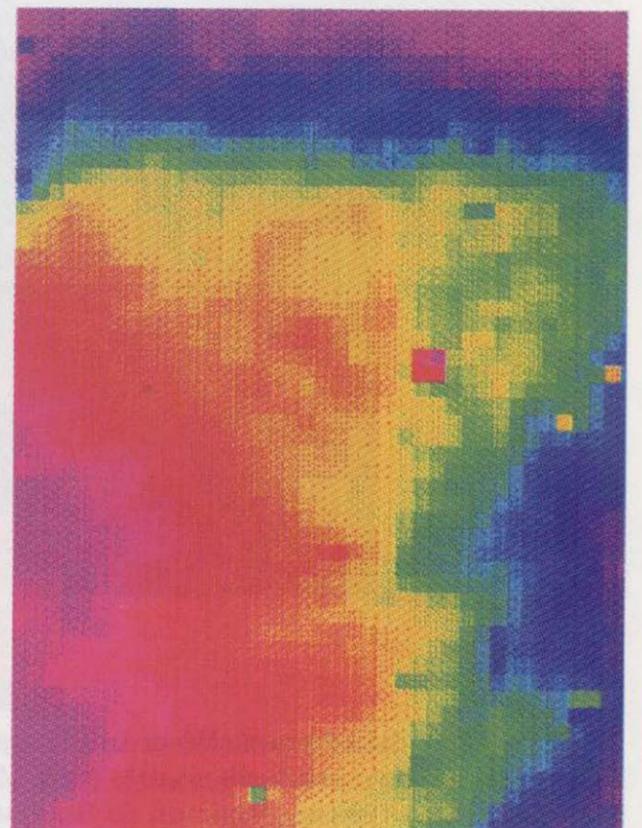
Fig. 1.- Imagen obtenida por superposición de dos imágenes de paleta monocromática: verde para la topografía y rojo para la anomalía de Bouguer. La correlación entre ambos valores por el color de combinación, solo resulta evidente para los valores máximos (color amarillo). La imagen no es fácilmente analizable.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2.- Imágenes de paleta completa para la topografía (a), anomalía de Bouguer en 2.6 g/cm^3 (b) y 2.0 g/cm^3 (c). La flecha indica la aparición de una falsa anomalía por correlación con la topografía, al utilizar 2.6 g/cm^3 .



(a)



(b)

Fig. 3.- Imagen obtenida por eliminación de rangos (dejando solo los valores máximos o mínimos) de las imágenes de la fig. 2, con asignación de paletas de un solo tono (verde a los máximos de topografía; rojo a los mínimos de anomalía de Bouguer), y superposición de la topografía con la anomalía en densidad 2.6 (a) y en densidad 2.0 (b). El color de superposición destaca las zonas de correlación. La comparación de resultados en las dos densidades permite seleccionar las falsas anomalías.

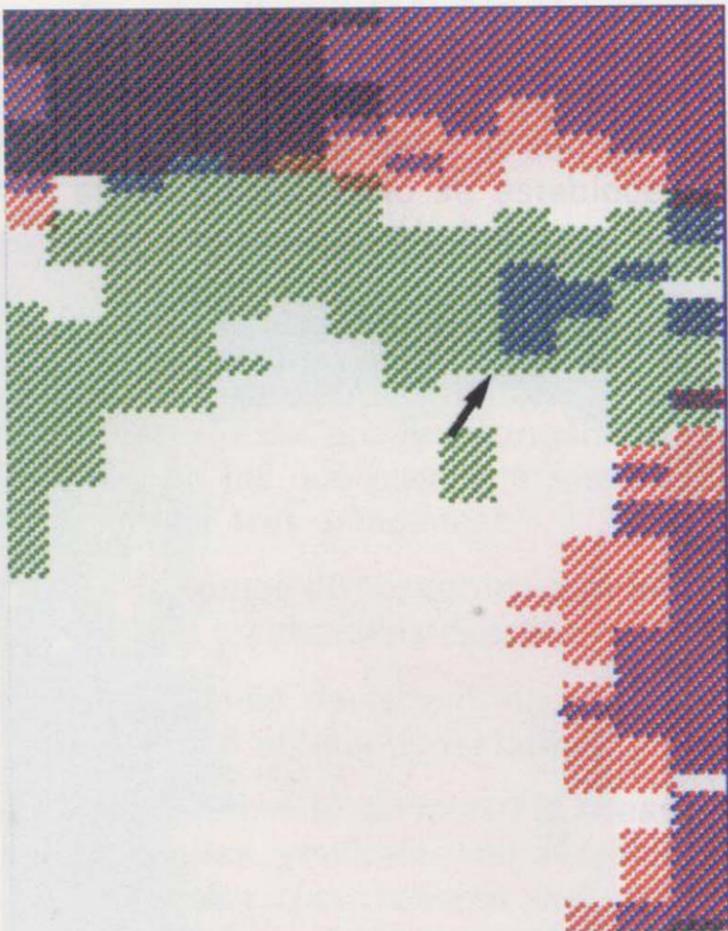


Fig. 4.- Imagen de superposición de tres imágenes de rango restringido y paleta de un solo tono. Máximos de topografía en verde. Mínimos de Bouguer a 2.0 g/cm^3 en rojo. Mínimos de Bouguer a 2.6 g/cm^3 en azul. El color de superposición azul+verde destaca las zonas donde la densidad 2.6 resulta elevada, siendo por tanto esta imagen equivalente a la superposición de las dos imágenes de la fig. 3

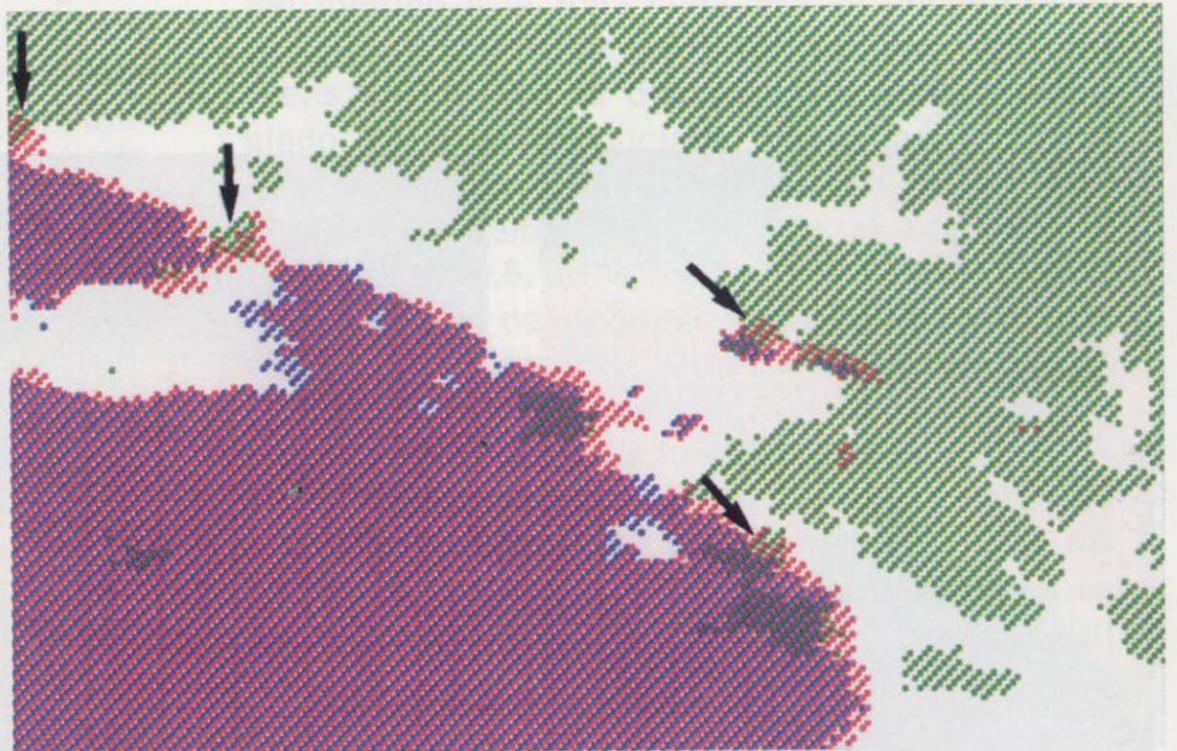
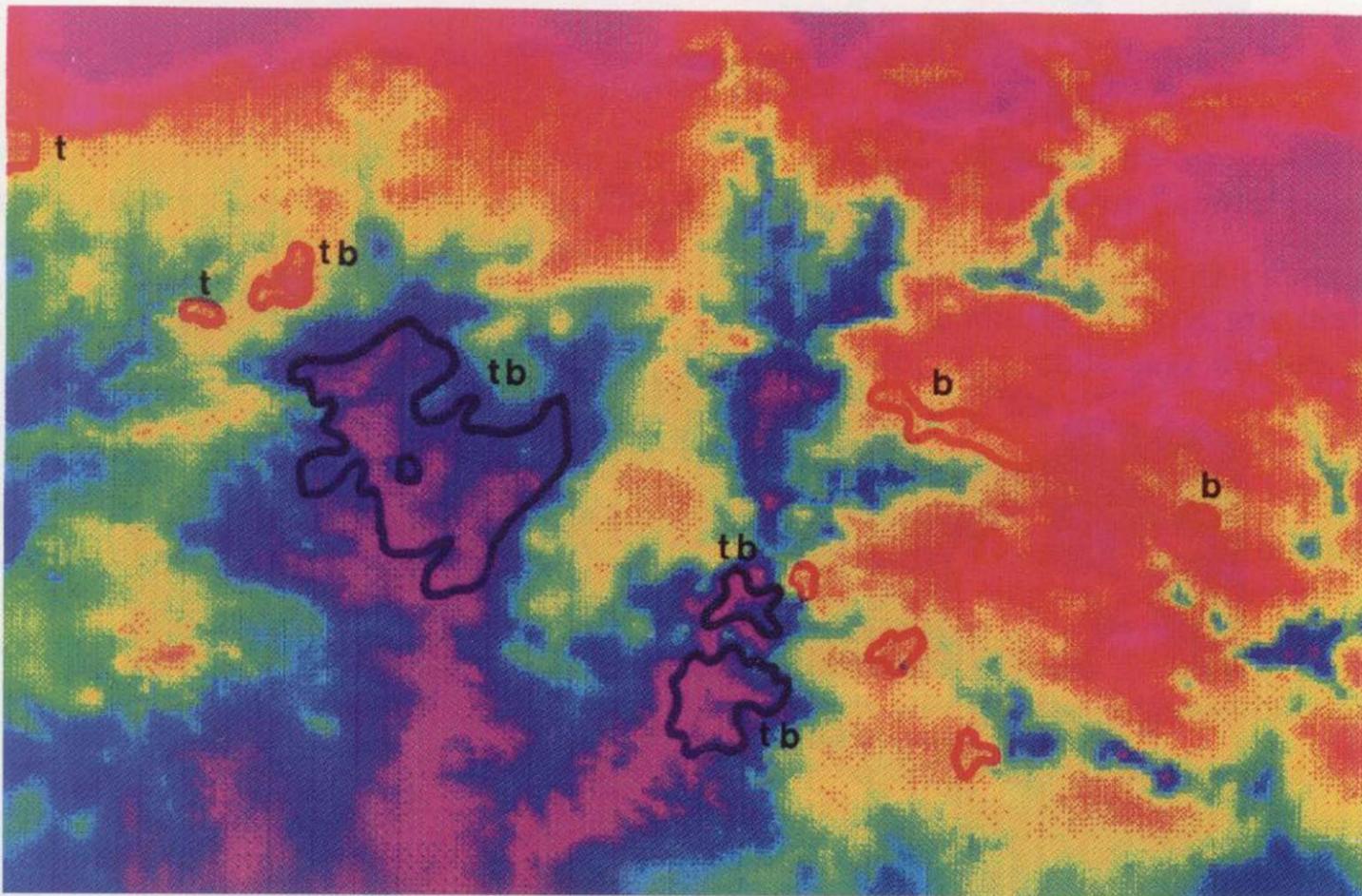
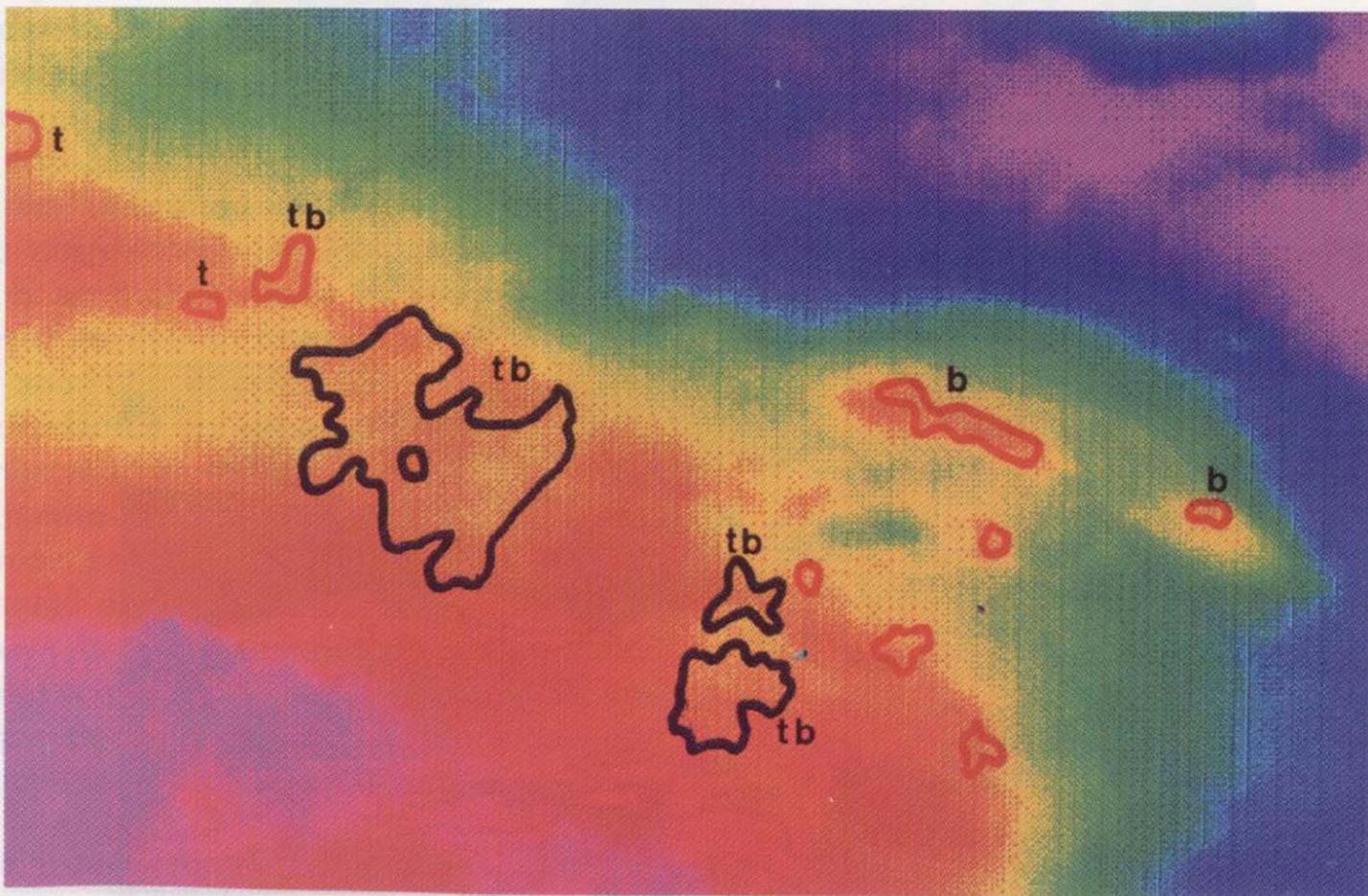


Fig. 5.- Imagen de superposición aplicando la técnica descrita en la fig. 4 a todo el área prospectada. Máximos de topografía en verde. Máximos de Bouguer a 2.6 g/cm^3 en rojo. Máximos de Bouguer a 2.8 g/cm^3 en azul. El color de superposición rojo+verde destaca las zonas donde la densidad 2.6 resulta insuficiente.

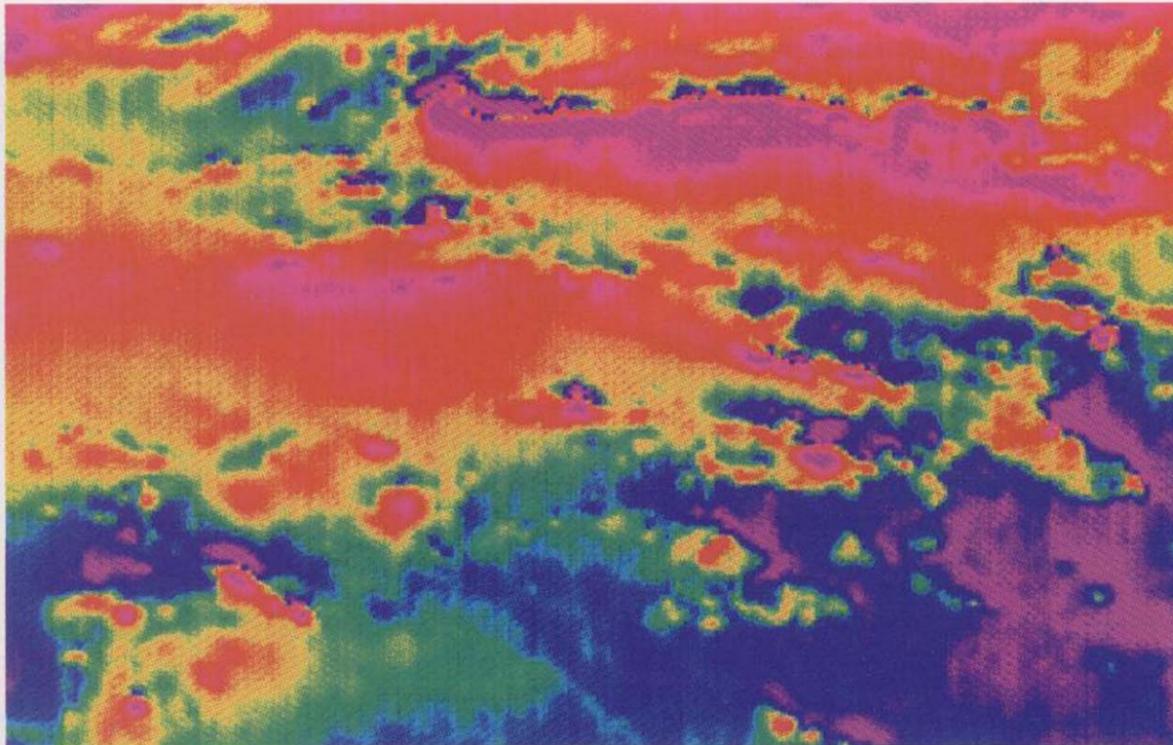


(a)

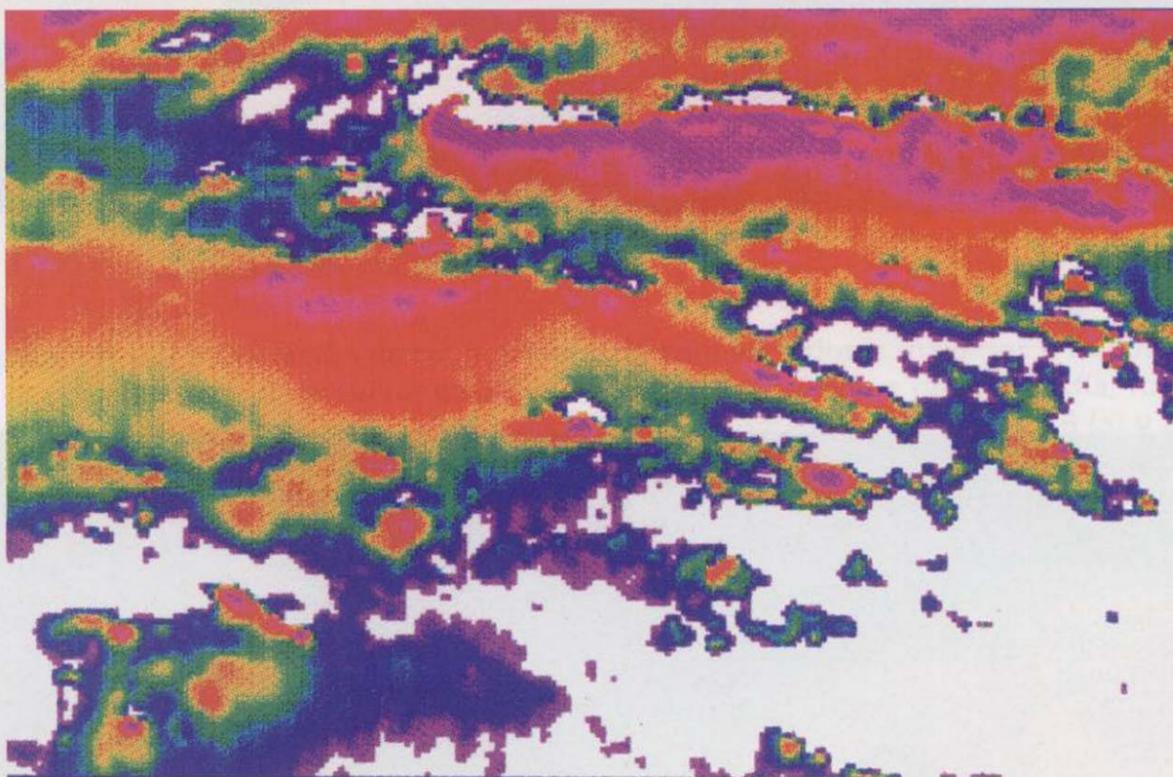


(b)

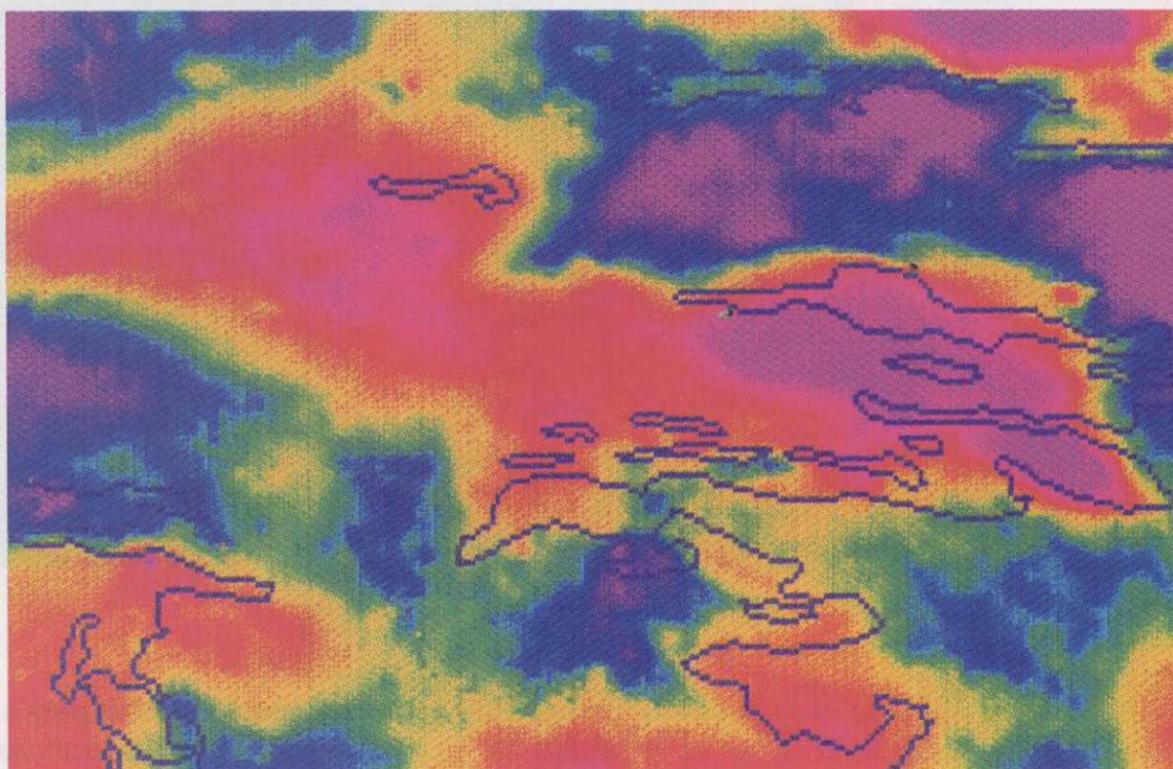
Fig. 6.- Resultado del análisis de densidades. Superposición sobre las imágenes de paleta completa de topografía (a) y anomalía de Bouguer en densidad 2.6 g/cm^3 (b) de las áreas seleccionadas por aplicación del método descrito en la fig. 5. El contorno negro indica áreas donde 2.6 es una densidad excesivamente alta. El contorno rojo, indica las áreas donde esta densidad resulta demasiado baja. Existe una excelente correspondencia con accidentes topográficos o gravimétricos singulares.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7.- Ejemplos de aplicación al análisis cualitativo. (a) imagen de valores aeromagnéticos, con paleta completa. (b) Imagen de valores aeromagnéticos, con eliminación de rangos (inferiores a 770 nT) y redistribución de paleta completa. (c) Superposición de ficheros vectoriales sobre una imagen de anomalías gravimétricas residuales, delimitando el contacto superficial de una de las unidades geológicas en estudio.

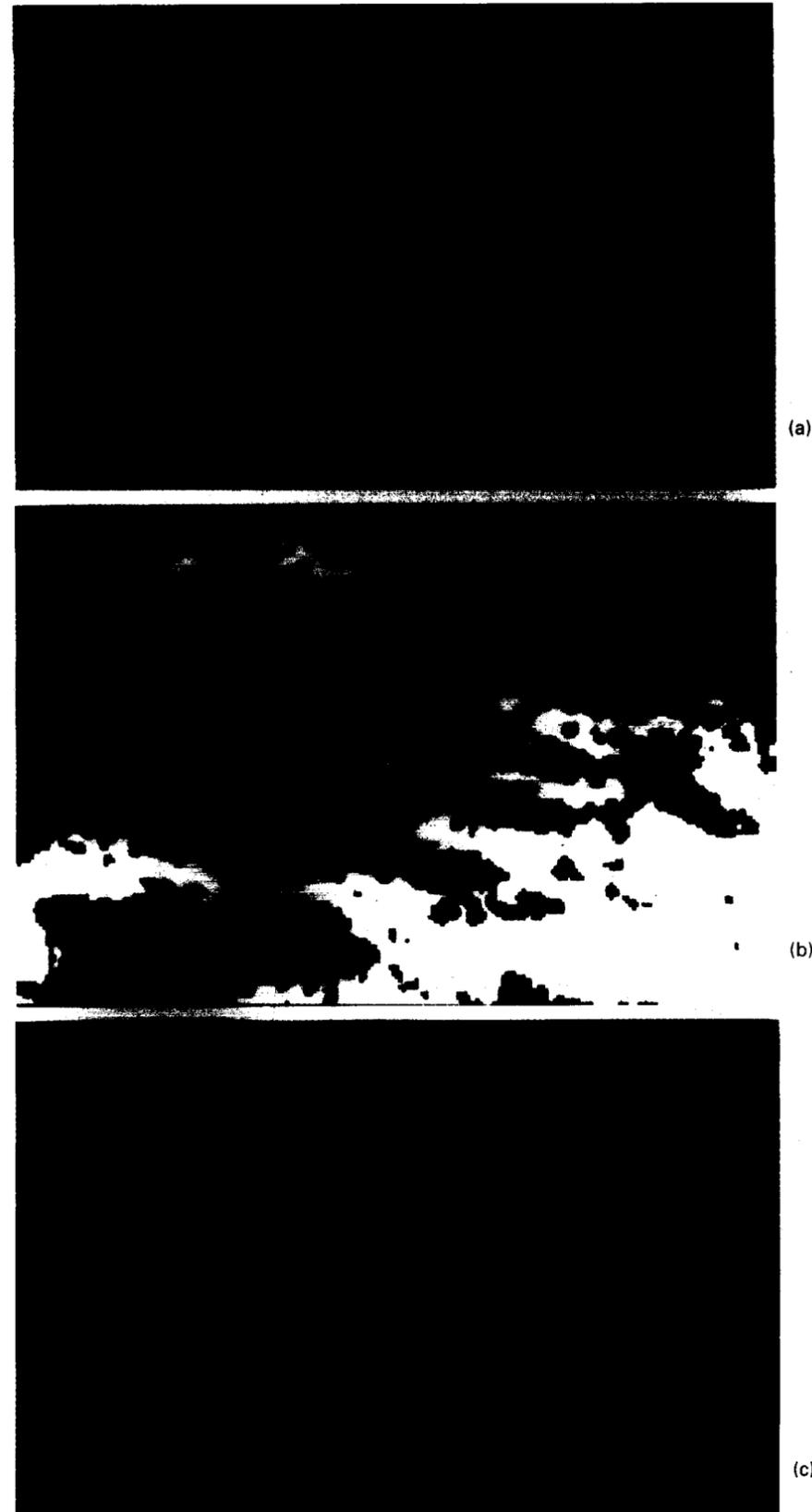


Fig. 7.- Ejemplos de aplicación al análisis cualitativo. (a) imagen de valores aeromagnéticos, con paleta completa. (b) Imagen de valores aeromagnéticos, con eliminación de rangos (inferiores a 770 nT) y redistribución de paleta completa. (c) Superposición de ficheros vectoriales sobre una imagen de anomalías gravimétricas residuales, delimitando el contacto superficial de una de las unidades geológicas en estudio.

efectuar esta separación de anomalías podría ser el proceso de regionalización, mediante el cual se asume que parte de las anomalías gravimétricas son debidas a causas profundas y extensas, formando anomalías de tipo regional. La diferencia entre el mapa de Bouguer y las anomalías regionales, da lugar al mapa de anomalías residuales, en principio de origen más local y superficial, y por tanto, con mayor probabilidad de estar relacionadas con la topografía. La anomalía regional supone el establecimiento de un nivel cero, a partir del cual las anomalías residuales quedan escindidas en positivas o máximos y negativas o mínimos.

Por ajuste de superficies, se han obtenido las anomalías regionales, y mediante sustracción del Bouguer, las residuales, construyendo nuevas imágenes, en las que utilizando la técnica de separación por rangos, eligiendo como límite el cero de las anomalías, y aplicando los mismos límites topográficos que en el caso anterior, se han obtenido las imágenes de correlación por triple superposición, de las que se han vuelto a deducir las zonas de anomalía de origen dudoso. Estas, han resultado mucho más numerosas que las deducidas utilizando el mapa de Bouguer. Además su correspondencia con accidentes topográficos o anomalías netas es menor. Pensamos que esto es debido por una parte al hecho de que la anomalía regional también tiene un grado de correlación con la topografía, y por otra a que la anomalía residual, aun en los casos en que no presente correlación, se ve modificada de forma más sensible con el empleo de una u otra densidad en los cálculos, lo que en esencia constituye la base del método de prospección gravimétrico y de donde se deduce la importancia que tiene el uso de una densidad correcta y entornos de relieves accidentados.

La conclusión que se obtiene es, pues, que los análisis de correlación con la topografía, hay que llevarlos a cabo con los mapas de anomalía de Bouguer, a pesar de la incertidumbre que pueda producirse en la elección subjetiva de los límites de máximos y mínimos. En cualquier caso, tampoco el grado de ajuste o sistema elegido en la regionalización deja de tener una componente subjetiva.

El método desarrollado se puede concretar por tanto en los siguientes pasos:

- Construir una imagen de paleta completa, con distribución de colores por histograma ecualizado, para cada uno de los siguientes documentos:
 - mapa topográfico,
 - mapa de anomalía de Bouguer en la densidad elegida como mejor para toda la zona: d_1 ,
 - mapa de anomalía de Bouguer en densidad $d_0 < d_1$ y
 - mapa de anomalía de Bouguer en densidad $d_2 > d_1$.
- Mediante la técnica de eliminación de rangos de colores, desdoblarse cada una de las imágenes anteriores en dos: una conteniendo lo que se consideran máximos y otra con los mínimos.
- Mediante la técnica de modificación de paletas, asignar un color básico de un solo tono a cada tipo de dato:
 - verde a las imágenes de topografía,
 - azul a las imágenes de Bouguer en d_1 ,
 - rojo a las imágenes de Bouguer en d_0 , y
 - rojo a las imágenes de Bouguer en d_2 .
- Obtener mediante la técnica de superposición de imágenes las cuatro siguientes:
 - combinación de mínimos topográficos con máximos gravimétricos en d_1 y d_0 ,
 - combinación de máximos topográficos con mínimos gravimétricos en d_1 y d_0 ,
 - combinación de mínimos topográficos con mínimos gravimétricos en d_1 y d_2 , y
 - combinación de máximos topográficos con máximos gravimétricos en d_1 y d_2 .
- De las dos primeras imágenes se deducen las zonas en que la densidad d_1 puede resultar demasiado grande, dando anomalías por

efectos topográficos. Estas zonas se identifican por ser las del color resultante de la superposición de verde y azul. De las dos últimas imágenes se deducen las zonas en que la densidad d_1 puede resultar demasiado pequeña, dando anomalías por efectos topográficos. Estas zonas se identifican por ser las del color resultante de la superposición de verde y azul.

ANALISIS DE MAPAS DE ANOMALIAS

Otro tipo de aplicación, propuesto en los objetivos de este trabajo, es la utilización del proceso de imágenes en la interpretación cualitativa de mapas de anomalías.

Se ha utilizado, para ello, la misma zona de la aplicación precedente, es decir un conjunto de cuatro hojas a escala 1:50.000 de la Faja Pirítica. Como documentos gravimétricos se van a emplear los generados anteriormente: mapa de anomalías de Bouguer en densidad $2,6 \text{ g/cm}^3$ y su residual; a estos datos se ha añadido el mapa correspondiente de anomalías aeromagnéticas, que se muestra en la figura 7, siendo estas imágenes la base para el análisis.

La descripción de los mapas de anomalías se ha efectuado sobre la pantalla del ordenador, utilizando para ello transformaciones de paletas de color, eliminación de rangos, redistribuciones de asignaciones de color, etc., así como, iluminación de imágenes de sombras en el caso de datos magnéticos. La utilización de estas técnicas, cuya respuesta se obtiene en tiempo real y con toda reversibilidad, se ha mostrado como una herramienta de extraordinario interés en el análisis cualitativo de mapas geofísicos. Muestra de ello puede ser la imagen de la figura 7b, donde la eliminación de rangos inferiores a 770 nT ofrece una gran correlación con la cartografía de una de las unidades geológicas presentes en el área. La reasignación de la paleta completa al resto de los valores restringidos, aumenta el grado de detalle, facilitando el análisis de los datos.

Para otro tipo de análisis llevado a cabo, en la determinación de las facies geofísicas de las

diversas unidades, se han generado ficheros vectoriales con los límites indicados en la cartografía geológica de superficie, a fin de superponerlos a las imágenes de datos geofísicos. La mejor técnica de análisis se ha conseguido mediante la superposición de cada unidad por separado a los mapas de anomalías (fig. 7c), lo que se ha manifestado como una alternativa muy ventajosa a otras formas de estudio, como puede ser con los documentos en soporte de papel.

Las principales ventajas observadas con el uso de estas técnicas, pueden sintetizarse en:

- la técnica de iluminación de imágenes de sombras, permite la apreciación de alineaciones con más nitidez que en las imágenes en color;
- la redistribución de la paleta completa en áreas restringidas, permite una mejor apreciación de los gradientes, así como de la forma de las anomalías, obteniéndose conclusiones equivalentes a las que sólo es posible obtener mediante técnicas de regionalización o de derivación;
- el grado de observación que es posible efectuar en las imágenes no es viable en otro tipo de representaciones, como los mapas de isolíneas, donde se llega antes a la confusión de líneas que a la apreciación de los detalles, sobre todo en las zonas de alto gradiente.

En contraprestación, pueden hacerse dos tipos de objeción:

- la cantidad de detalle contenido en una imagen requiere un mayor entrenamiento para su observación,
- no deben emplearse paletas de círculo de color completo, a fin de evitar la difícil separación entre los diversos colores calientes, en su rango de mayor frecuencia (rojos).

La preparación de los datos, así como la realización de todos los procesos necesarios para llevar a cabo este trabajo ha constituido el Proyecto Fin de Carrera de D.^a Sofía Somoza, labor realizada íntegramente en el área de Geofísica del ITGE.

REFERENCIAS

- GONZALEZ, R. C., y WINTZ, P. (1987): *Digital image processing*, Addison-Wesley Publishing Company. Canadá.
- DAVIS, J. C. (1973): *Statistics and data analysis in Geology*. John Wiley & Sons Editors. EE. UU.
- PLATA TORRES, J. L. (1983): *Nuevo método de cálculo de la densidad de reducción en gravimetría*. Boletín Geológico y Minero, ITGE. Madrid. T. XCIV-VI, pp. 510-520.
- PLATA TORRES, J. L., y GARCIA LOBON, J. L. (1985): *Tendencias actuales para tratamiento de datos gravimétricos: aplicación de un sistema desarrollado por el IGME*. Boletín Geológico y Minero, ITGE. Madrid. T. XCVI-IV, pp. 413-423.
- BROOME, H. J. (1990): *Generation and interpretation of geophysical images with examples from the Rae Province, Northwestern Canada Shield*. Geophysics, SEG, EE. UU. Vol. 55, n.º 8, pp. 977-997.
- KOWALIK, W. S., y GLENN, W. E. (1987): *Image processing of aeromagnetic data and integration with landsat images for improved structural interpretation*. Geophysics, SEG, Vol. 52, n.º 7, pp. 875-884.

Original recibido: Octubre de 1994.

Original aceptado: Noviembre de 1994.

INGENIERIA GEOAMBIENTAL

Caracterización geológico-geotécnica de la Facies Entrala (Paleógeno) en los alrededores de la Ciudad de Zamora.

Por M. O. GONZALEZ (*), J. A. BLANCO (*), S. MONTERRUBIO (*),
M. YENES (*) y C. J. MARTINEZ (**)

RESUMEN

Se ha realizado una caracterización geológico-geotécnica en la Facies Entrala (Paleógeno) en los alrededores de la ciudad de Zamora. Para ello se han estudiado un conjunto de muestras obtenidas, tanto en afloramientos, como en sondeos a rotación con recuperación continua de testigo. Dicha caracterización ha permitido, en primer lugar, discriminar cuatro grupos litológicos en base a su mineralogía determinada por difracción de Rayos X y, en segundo lugar, agrupar el conjunto de muestras en cinco grupos geotécnicos en función de sus características. Los cinco grupos geotécnicos se adaptan perfectamente al modelo geológico propuesto. Finalmente se ha realizado un estudio cualitativo del potencial expansivo de los materiales de la Facies Entrala.

Palabras clave: Cuenca del Duero, Paleógeno, Facies Entrala, Características resistentes, Expansividad.

ABSTRACT

A geological-geotechnical characterization was made of the Entrala Facies (Paleogene) in the vicinity of the city of Zamora. For this purpose a study was made of a set of samples obtained in outcroppings and rotation borings, with continuous core recovery. This characterization has made it possible, in the first place, to distinguish four different lithological groups, according to their mineralogy determined by X-ray diffraction, and secondly, to classify the set of samples in five geotechnical groups according to their characteristics. The five geotechnical groups adapt perfectly to the geological model proposed. Finally, a qualitative study was made of the expansive potential of the materials of the Entrala Facies.

Key words: Duero Basin, Paleogene, Entrala Facies, Resistant Characteristics, Expansivity.

1. INTRODUCCION

En los alrededores de la ciudad de Zamora se pueden identificar dos conjuntos litológicos perfectamente diferenciados, el Zócalo Hercínico y los materiales correspondientes al Terciario, que reposan discordantemente sobre los anteriores (fig. 1). Dentro del conjunto de sedimentos terciarios se pueden diferenciar dos grandes ciclos:

- 1.º Un ciclo de edad paleógena formado por tres unidades (Inferior, Media y Superior), definidas por CORROCHANO (1977).
- 2.º Un ciclo neógeno constituido por dos gran-

des series (Series Rojas y Series Ocre), según MARTIN-SERRANO (1988).

Encajados en este conjunto de sedimentos terciarios, y en los propios materiales del Zócalo Hercínico, se diferencian diversos niveles de terrazas formadas por la evolución del río Duero.

Este trabajo se ha centrado en el estudio de una facies particular de la Unidad Media del Paleógeno zamorano. Se trata de la Facies Entrala, definida por CORROCHANO (op. cit.), de edad Eoceno inferior-medio (JIMENEZ, 1977), que aparece ampliamente representada en los alrededores de la ciudad de Zamora. Dicha facies reposa disconforme sobre la denominada Facies Zamora, perteneciente a la Unidad Inferior paleó-

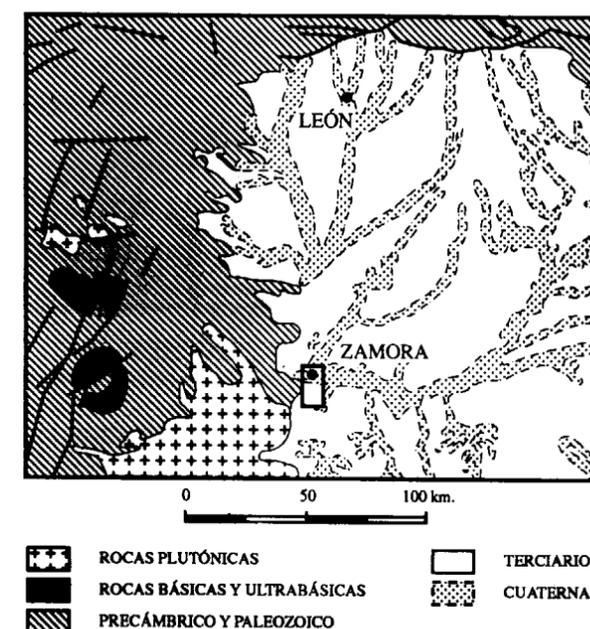


Figura 1.—Esquema general de la geología del borde occidental de la Cuenca del Duero y localización del área de estudio.

gena, y cuya principal característica es el intenso proceso de silicificación que ha sufrido, lo cual le confiere una gran compacidad y dureza.

La ciudad de Zamora está cimentada sobre materiales paleógenos (Facies Zamora y Facies Entrala) y sobre las terrazas dejadas por la evolución del río Duero. La Facies Zamora no presenta problemas geotécnicos debido al proceso de silicificación antes mencionado, constituyendo un excelente nivel de cimentación. Sin embargo, la Facies Entrala, debido a sus características petrológicas y geotécnicas, que serán descritas más adelante, sí presenta potenciales problemas como nivel de cimentación.

Los objetivos que se plantean al abordar la caracterización de la Facies Entrala, tanto en su aspecto geológico como geotécnico, son los siguientes:

- 1.º Una cartografía geológica de la Facies en los alrededores de la ciudad de Zamora y la descripción de sus litologías, basada en las asociaciones mineralógicas características obtenidas mediante difracción de rayos X.

- 2.º La identificación y clasificación geotécnica de las diferentes muestras tomadas, para llegar a una agrupación de las mismas en grupos geotécnicos independientes, que culmina con un intento de correlación entre las litologías geológicas y los grupos geotécnicos discriminados; para ello se han realizado una serie de ensayos, tanto *in situ* como de laboratorio, con la intención de definir las características resistentes de los diferentes materiales identificados.

- 3.º Dada la mineralogía de naturaleza esmectítica detectada, se hace una valoración, de forma cualitativa, del potencial expansivo de los diferentes grupos.

Finalmente merece resaltarse que este trabajo recoge las principales conclusiones de la Tesis de Licenciatura de uno de los autores (GONZALEZ, 1994), pudiendo consultarse en esta memoria los pormenores y la metodología completa desarrollada.

2. CARACTERIZACION GEOLOGICA

La Facies Entrala constituye, en Zamora capital y sus alrededores más próximos (fig. 2), la segunda unidad de sedimentación paleógena, apoyándose de forma disconforme sobre la facies superior de la Unidad Inferior del Paleógeno, es decir, sobre las areniscas silicificadas de la Facies Zamora. Se ha detectado la presencia de fauna piscícola, así como reptiles, que han permitido datar esta Unidad Media como depósitos pertenecientes al Eoceno inferior y medio (Luteciense) (JIMENEZ, op. cit.).

Son depósitos detríticos, de granulometría muy fina, constituidos por una serie de alternancias de limolitas arcillosas, margas pelíticas y arenas muy finas y bien calibradas, localizándose en algunos puntos rellenos canalizados de granulometría más gruesa.

Se pueden diferenciar tres tramos litológicos correspondientes a medios sedimentarios distintos (fig. 3):

- *El tramo basal* constituido por dos niveles separados claramente por una superficie erosiva. El nivel inferior transicional, de unos 5 m. de potencia mínima, está constituido por

(*) Depto. Geología. Univ. de Salamanca. Plaza de la Merced, s/n. 37008 Salamanca. 923/29 44 96.

(**) I.N.Z.A.M.A.C. Ctra. de la Hiniesta, 118. 49002 Zamora.

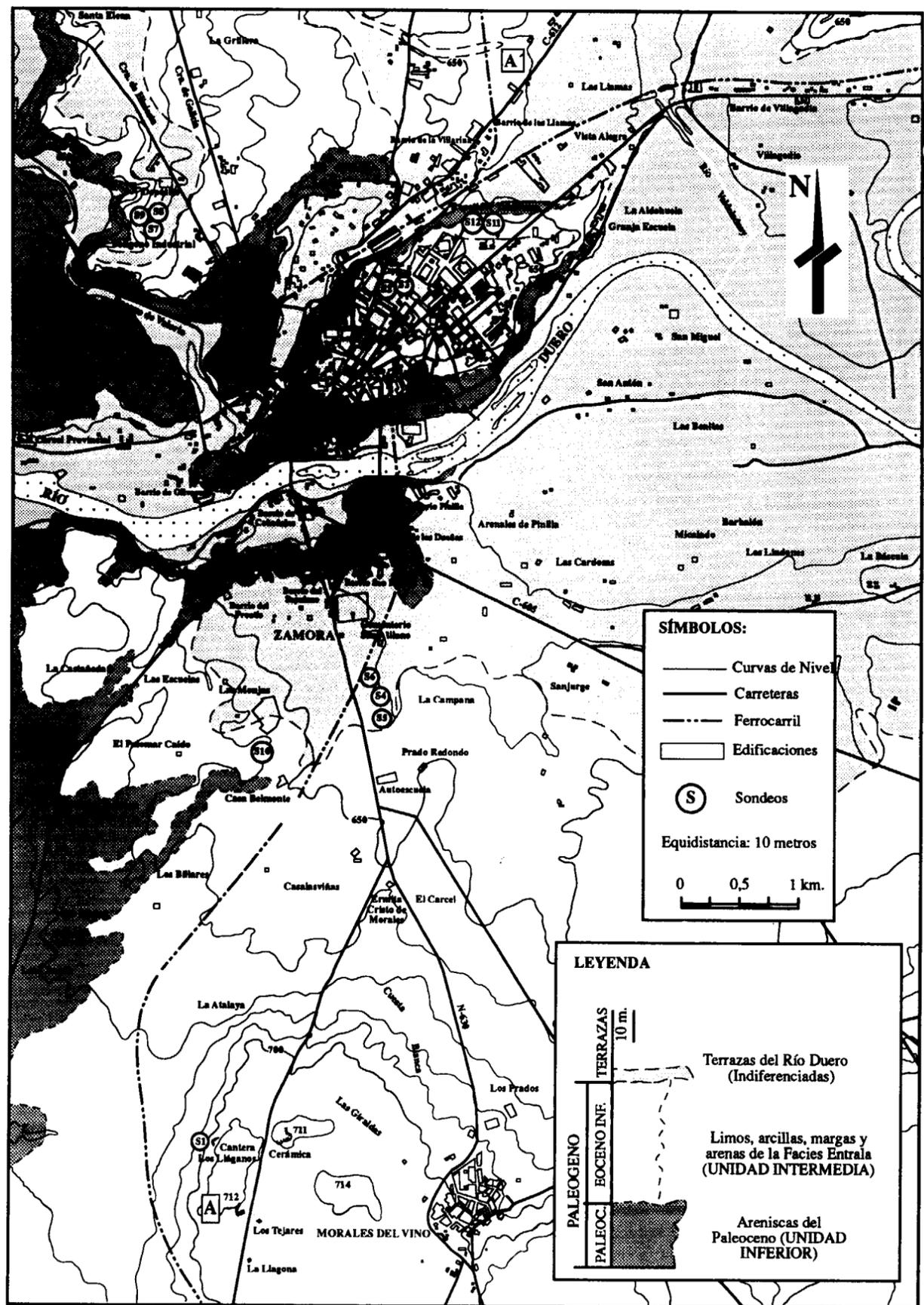


Figura 2.—Mapa geológico de la zona estudiada. Realizado en base a datos propios y a cartografías previas de CORROCHANO et al. (1980 y 1982).

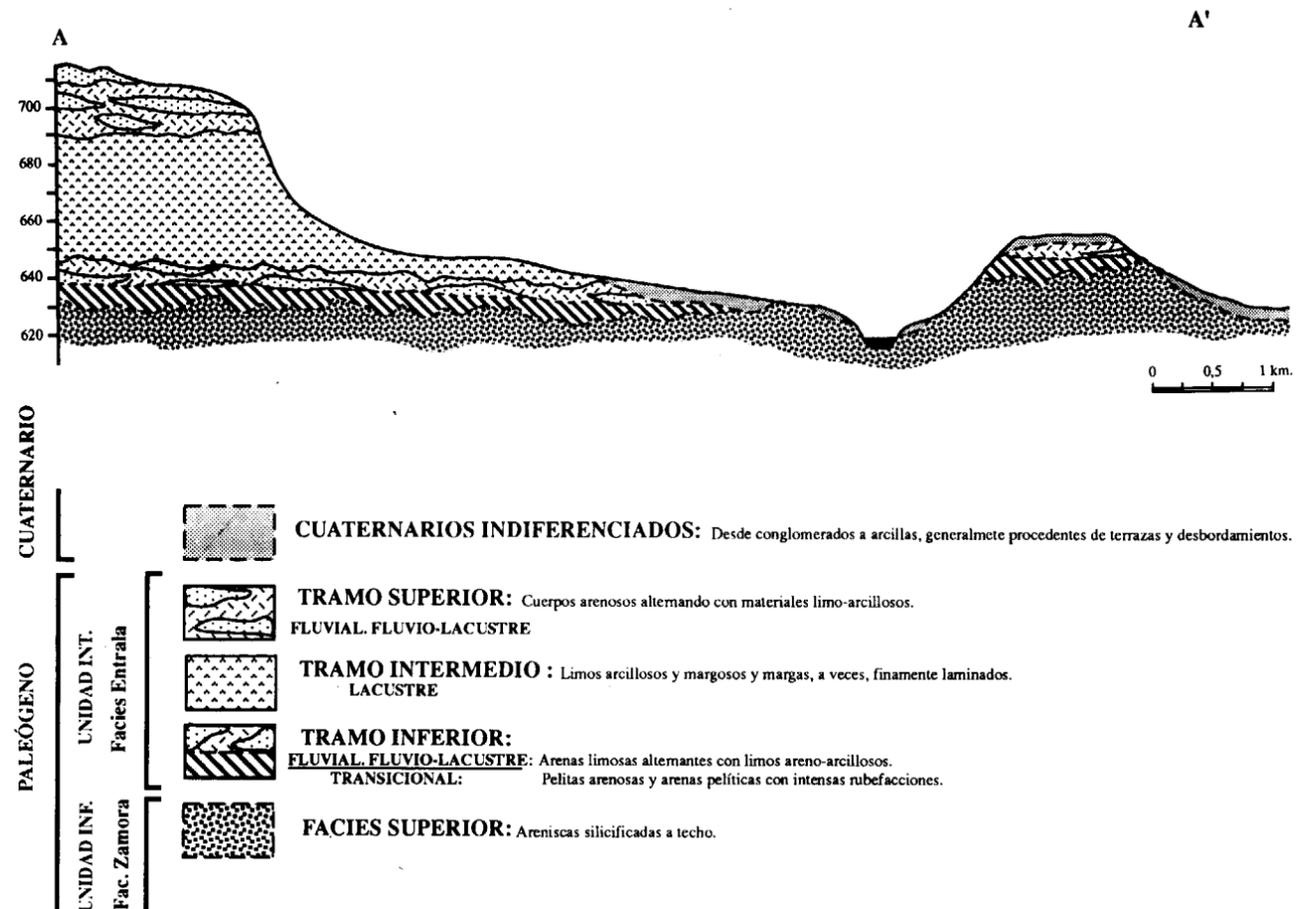


Figura 3.—Corte geológico A-A' (localización en la figura 2).

material detrítico de cuarzo mal calibrado, en una matriz limo-arcillosa cuya característica más llamativa es una intensa alteración por óxidos de hierro, que le da tonalidades muy dispares entre rojas, amarillas, verdes y violáceas. Cuando este material se encuentra recubierto por terrazas presenta intensos encostramientos carbonatados. Este nivel transicional hace pensar en un periodo de escasa sedimentación, que favorecería el desarrollo de paleosuelos, lo cual va a provocar intensas bioturbaciones y la superposición de procesos de hidromorfismos. Este conjunto de procesos terminan rompiendo la estructura del material, dando un aspecto caótico al nivel y generando tonalidades abigarradas características.

Sobre él se localiza el nivel superior de este tramo, con una potencia no menor de 4 m., constituido por cuerpos arenosos, con granu-

lometrías gruesas en la base que pasan a arenas muy finas y bien calibradas, siendo ligeramente limo-arcillosas hacia el techo. Estos cuerpos se encuentran alternando con limolitas tanto arenosas como arcillosas. Su origen es preferentemente fluvio-lacustre (CORROCHANO, op. cit.), tendiendo a desarrollar hacia techo granulometrías cada vez más finas que terminan en los depósitos típicamente lacustres del siguiente tramo.

— El tramo intermedio, de al menos 40 m. de potencia, presenta una alternancia de materiales muy finos, de carácter preferentemente limolítico y margoso, que ocasionalmente presenta intercalaciones arenosas de granulometría muy fina. Las tonalidades de estos niveles suelen ser verdosas y presentan laminaciones muy finas. A veces se superponen encostramientos carbonatados en forma de

nodulizaciones o acintamientos. Existen intercalados niveles de tonalidades rojizas y violáceas, que se han interpretado como paleosuelos incipientes, existiendo uno de mayor desarrollo en el tránsito de este tramo intermedio al superior.

La presencia de granulometrías muy finas, con laminaciones planares y estructuras de inyección de arcilla (CORROCHANO, op. cit.), hace pensar que se trata de un medio lacustre, con períodos de desecación que favorecen la formación de suelos. Todo el tramo aparece surcado por canales de bajo poder erosivo y aguas lentas donde se produce el depósito de algunos niveles arenosos.

- *El tramo superior*, con una potencia observada de 14 m. desarrolla cuerpos arenosos de mayor entidad, con estructuras sedimentarias de corriente que indican un medio de sedimentación fluvial de mayor energía. Estos cuerpos arenosos se encuentran intercalados entre materiales más finos, semejantes a los del tramo anterior, pero con predominio de las limolitas y arcillas frente a las margas. Las concreciones carbonatadas aumentan considerablemente. Ocasionalmente se encuentran rellenos canalizados de granulometría más gruesa tamaño grava.

2.1. Grupos litológicos

En base a la composición mineralógica, determinada a partir de análisis por difracción de rayos X en roca total, por el método del polvo, y a su clasificación geológica a partir de los diagramas triangulares de VATAN (1967) y PICARD (1971) se han obtenido cuatro grupos litológicos:

- *Limolitas y Limolitas Arcillosas*: son materiales detríticos de granulometría muy fina y tonalidades que varían desde amarillentas a verdosas, pasando por colores grisáceos. Están constituidas fundamentalmente por cuarzo, en proporciones medias del 65 por 100. Por lo general son arcillosas, siendo la arcilla dominante la esmectita, y en menor proporción illita; esporádicamente puede aparecer caolinita, en las muestras obtenidas en los tramos basal y superior, nunca en el tramo intermedio de carácter lacustre. En todas ellas se encuentran contenidos variables en

carbonatos, fundamentalmente calcita, aunque ocasionalmente se detecta algo de dolomita. La presencia de feldespatos es generalizada, aunque en cantidades siempre inferiores al 2 por 100.

Esta litología se encuentra alternando con materiales margosos de la unidad litológica que se describe a continuación. Cuando estas limolitas se localizan intercaladas en cuerpos arenosos, su proporción de arena aumenta notablemente, disminuyendo en gran medida el contenido en arcilla.

TABLA I
Asociación mineralógica característica de las Limolitas y Limolitas Arcillosas

LITOLOGÍA	MINERALOGÍA	%	LOCALIZACIÓN
Limolitas	Cuarzo (Q)	65	• Tramo basal (nivel superior).
	Esmectita (Sm)	20	
y	Illita (I)	4	• Tramo intermedio
Limolitas	Caolinita (K) (ocasional)	1	
Arcillosas	Calcita (Cc)	7,5	(sin caolinita).
	Dolomita (Do)	1	• Tramo superior.
	Feldespato (Fd)	1,5	

- *Margas y Lutitas Margosas*: se trata en general de lutitas margosas, existiendo algunas muestras donde el carácter margoso es más acentuado. Los contenidos en calcita, y ocasionalmente dolomita, son muy variados, oscilando entre el 45 y el 30 por 100 de la roca total. El resto de los componentes mineralógicos son cuarzo detrítico, arcillas, principalmente esmectita y en menor medida illita, y por último, feldespato en pequeñas proporciones.

La litología margosa presenta tonalidades verdosas de forma generalizada, siendo ésta una característica típica de este material, aunque no exclusiva, ya que en las limolitas las tonalidades verdosas son también frecuentes. Estas dos litologías, alternando mutuamente, constituyen los materiales de la Facies Entrala típicamente lacustres, presentando en ocasiones intercalaciones de niveles arenosos de pequeña entidad y granulometría muy fina.

- *Arenas Limosas*: esta litología está amplia-

TABLA II
Asociación mineralógica característica de las Margas y Lutitas Margosas

LITOLOGÍA	MINERALOGÍA	%	LOCALIZACIÓN
Margas	Cuarzo (Q)	53	• Tramo intermedio
	Esmectita (Sm)	10	
y	Illita (I)	2,5	• Tramo superior (en menor proporción)
Lutitas	Carbonatos (Cc + Do)	33	
Margosas	Feldespato (Fd)	1,5	

mente representada, apareciendo en cuerpos canalizados con claras estructuras de laminación y estratificación cruzada, tanto paralela como curva. Su composición mineralógica es fundamentalmente cuarzo, con presencia de feldespato y calcita en trazas y con fracción arcillosa, poco abundante, compuesta por esmectita, caolinita e illita.

Un rasgo característico de estas arenas es la presencia de cantos blandos en la base y estructuras de corriente, observándose a veces una gradación desde arena gruesa a arena muy fina hacia el techo de los niveles. Su color suele ser blanquecino, a veces punteado de tonalidades marrones. Son arenas bien calibradas con tamaños de grano muy homogéneos. Es la litología más característica del tramo inferior y superior de la facies.

TABLA III
Asociación mineralógica característica de las Arenas Limosas

LITOLOGÍA	MINERALOGÍA	%	LOCALIZACIÓN
Arenas	Cuarzo (Q)	89,5	• Tramo superior
	Esmectita (Sm)	3,5	
	Illita (I)	1,5	
Limosas	Caolinita (K)	1,5	• Tramo inferior (nivel superior)
	Calcita (Cc)	2	
	Feldespato (Fd)	2	

- *Pelitas Arenosas y Arenas Pelíticas*: con este apelativo se reconocen unos materiales que van desde arenas limosas a pelitas arenosas, en los cuales su característica más peculiar es la intensa tinción ferruginosa que ha afectado sobre todo a la matriz. Se trata de gra-

nos de cuarzo mal calibrados envueltos en una matriz limo-arcillosa. Cuando este material se encuentra en contacto con los niveles de terraza del Duero desarrolla intensos encostramientos carbonatados; éstos son casi inexistentes cuando aparece protegido por el resto de la Facies Entrala.

La mineralogía de este nivel de paso entre las areniscas del Paleoceno y la Facies Entrala propiamente dicha es cuarzo y material arcilloso (10-15 por 100), presentando contenidos variables en carbonato, que corresponden a irregulares encostramientos carbonatados cuando existen terrazas encima. Hay dos aspectos peculiares en esta litología que la diferencian de las anteriormente descritas, por un lado la intensa rubefacción que la tiñe de tonalidades rojizas y violáceas; y, por otro, el alto contenido en caolinita y la ausencia total de illita.

TABLA IV
Asociación mineralógica característica de las Pelitas Arenosas y Arenas Pelíticas

LITOLOGÍA	MINERALOGÍA	%	LOCALIZACIÓN
Pelitas	Cuarzo (Q)	84,5	• Tramo basal (nivel inferior transicional)
	Arenosas	Esmectita (Sm)	
y	Caolinita (K)	4	
Arenas	Calcita (Cc) (hasta)	10	
Pelíticas	Feldespato (Fd) (en trazas)	-	
	Óxidos de Hierro	2	

3. CARACTERIZACION GEOTECNICA

Para la caracterización geotécnica de la Facies Entrala se han empleado técnicas de prospección y ensayos, tanto *in situ* como de laboratorio. Se han realizado diez sondeos a rotación, refrigerados por agua y con recuperación continua de testigo (sondeos S1 a S10, fig. 2). Se ha dispuesto además de la información de los sondeos S11 y S12 (fig. 2) realizados con anterioridad por la empresa I.N.Z.A.M.A.C. En cuanto a los ensayos *in situ*, se han realizado varios S.P.T. (Ensayo de Penetración Estándar) en algunos tramos de sondeos con litología arenosa y penetraciones dinámicas tipo Borros acompañando a todos los sondeos.

Tanto en el interior de los sondeos como de los testigos de avance de los mismos, se han tomado muestras, alteradas e inalteradas, para la realización de ensayos de laboratorio. Estos han sido de dos tipos, unos encaminados a la identificación y clasificación de las muestras, y otros realizados con el fin de determinar las características resistentes de los materiales estudiados.

3.1. Características de identificación y humedad. Grupos geotécnicos

A partir de los ensayos de laboratorio encaminados a la identificación y clasificación de las muestras tomadas de los testigos de avance de los sondeos (Límites de Atterberg, Humedad, Granulométricos y Clasificación: S.U.C.S. y A.A.S.H.T.O.), se han determinado las características de cada muestra y se han agrupado según criterios de plasticidad, granulométricos y de clasificación, obteniéndose cuatro grupos geotécnicos perfectamente definidos e independientes. En las figuras 4 y 5 se han representado las características de plasticidad y granulométricas correspondientes a estos grupos geotécnicos.

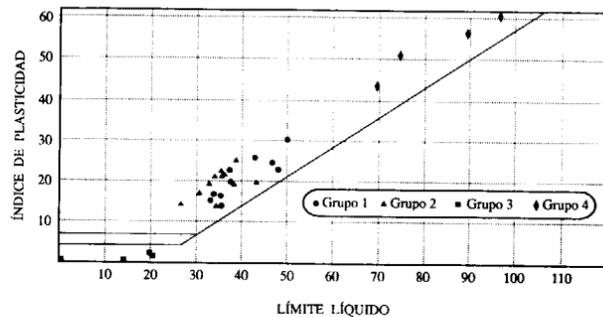


Figura 4.—Representación en el Gráfico de Plasticidad de Casagrande de los valores obtenidos en las muestras ensayadas, con indicación de los grupos geotécnicos diferenciados.

— *Grupo 0*: areniscas paleocenas pertenecientes a la facies superior de la denominada Unidad Inferior del Paleógeno, es decir, este grupo se corresponde con la denominada Facies Zamora, la cual subyace bajo los materiales de la Facies Entrala. Son arenas mal

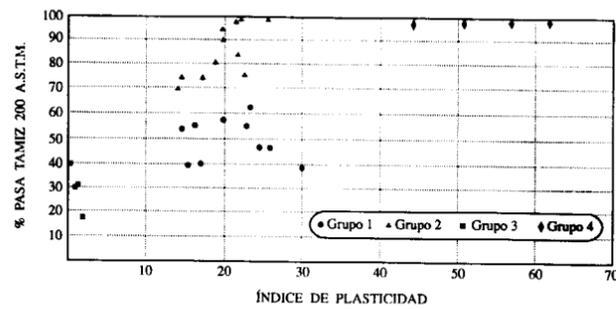


Figura 5.—Valores del índice de plasticidad con respecto al porcentaje que pasa por el tamiz núm. 200 A.S.T.M., para los diferentes grupos geotécnicos.

graduadas, caracterizadas por una intensa cementación silicea que les confiere una elevada resistencia. A partir de datos obtenidos de informes internos de la empresa I.N.Z.A.M.A.C., se puede clasificar este grupo, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), como arenas arcillosas (SC). Presentan valores inferiores al 40 por 100 que pasa por el tamiz núm. 200 A.S.T.M. (0,075 mm), y su índice de plasticidad oscila entre 15 y 17, es decir, presentan una plasticidad de media a baja, con humedades en torno a 11-12 por 100. Es importante reseñar que en la mayoría de los casos aparece como una roca fuertemente cementada.

— *Grupo 1*: entre las areniscas de la Facies Zamora antes citada y la Facies Entrala propiamente dicha, se localiza un nivel transicional, caracterizado por presentar índices de plasticidad que oscilan entre 14 y 26, es decir, con una plasticidad de media a baja, y entre el 40 y el 65 por 100 que pasa por el tamiz núm. 200 A.S.T.M. Esta oscilación va a provocar que la estructura granular de las arenas se vea alterada, haciendo que su clasificación, según el S.U.C.S., varíe entre arenas arcillosas (SC) y arcillas de baja plasticidad (CL). La humedad oscila entre el 9 y el 17 por 100.

Son materiales fácilmente reconocibles en campo por su aspecto caótico debido a la intensa rubefacción y procesos de carbonatación a que están sometidos.

— *Grupo 2*: dentro de este grupo se incluyen materiales de granulometría más fina que los

del grupo anterior. Granulométricamente se caracterizan por presentar valores entre el 70 y el 90 por 100 que pasa por el tamiz núm. 200 A.S.T.M. y la casi total ausencia de material retenido en el tamiz núm. 40 A.S.T.M. (0,42 mm). Se clasifican, según el S.U.C.S., como arcillas de plasticidad media a baja (CL), con valores del índice de plasticidad entre 18 y 26.

Se reconocen en campo por sus tonalidades amarillentas y grisáceas, ocasionalmente verdosas, con algunas rubefacciones, pero sin alcanzar el aspecto caótico y granular del Grupo 1.

Afloran en la zona NE y S de la ciudad, siendo la potencia de este tipo de materiales escasa en la zona SE aumentando hacia el NE. Aunque no se ha podido comprobar su espesor, éste parece poco importante si se compara con los cuerpos arenosos con los que alterna.

— *Grupo 3*: intercalados entre los materiales limo-arcillosos definidos en el Grupo 2 se encuentran unos cuerpos arenosos constituidos por arenas finas, entre 0,4 y 0,07 mm, limpias, o a veces con presencia de finos que no superan el 35 por 100 que pasa por el tamiz núm. 200 A.S.T.M. Su clasificación, según el S.U.C.S., corresponde a arenas limosas (SM), siendo su plasticidad muy baja, ya que nunca superan índices de plasticidad de 2. La humedad oscila entre el 13 y el 22 por 100, son arenas saturadas con frecuente presencia de niveles freáticos locales, posiblemente colgados. Se localizan en las mismas zonas que los materiales del grupo anterior, siempre intercalados con ellos.

— *Grupo 4*: materiales de granulometría muy fina pertenecientes a los niveles eminentemente lacustres de la facies estudiada. Son fácilmente reconocibles por sus tonalidades verdosas y grises. El criterio que facilita su discriminación no es tanto su granulometría, que es muy fina, más del 90 por 100 pasa a través del tamiz núm. 200 A.S.T.M., como su elevada plasticidad, índices de plasticidad entre 40 y 65 y humedades entre el 25 y el 45 por 100. Su clasificación según el S.U.C.S. es de arcillas de plasticidad alta (CH). Se localizan este tipo de suelos bastante alejados de la ciudad de Zamora y con potencias

reconocidas de más de 25 m al S de la ciudad (sondeo S1, fig. 2).

En la columna de la figura 6 pueden verse de forma resumida las principales características de los grupos geotécnicos identificados, así como su situación en la columna sedimentaria de la Facies Entrala.

Es interesante observar, comparando la figura 3 (corte geológico A-A') y la figura 6 (columna

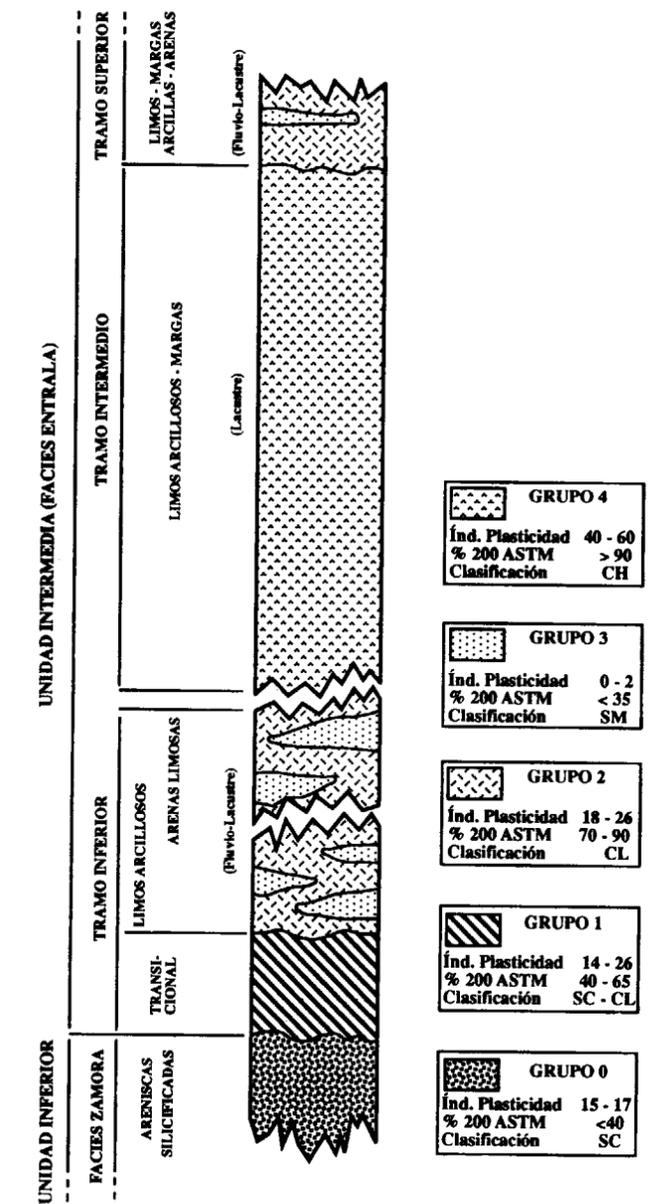


Figura 6.—Columna general de la Facies Entrala y grupos geotécnicos discriminados.

general de la Facies Entrala y grupos geotécnicos discriminados), la evidente relación que existe entre los grupos geotécnicos definidos y las litologías descritas en el apartado dedicado a la caracterización geológica, viéndose como se adaptan fielmente al modelo geológico expuesto. En la figura 7 se ha realizado un esquema geológico-geotécnico de la situación de los diferentes grupos bajo la ciudad de Zamora.

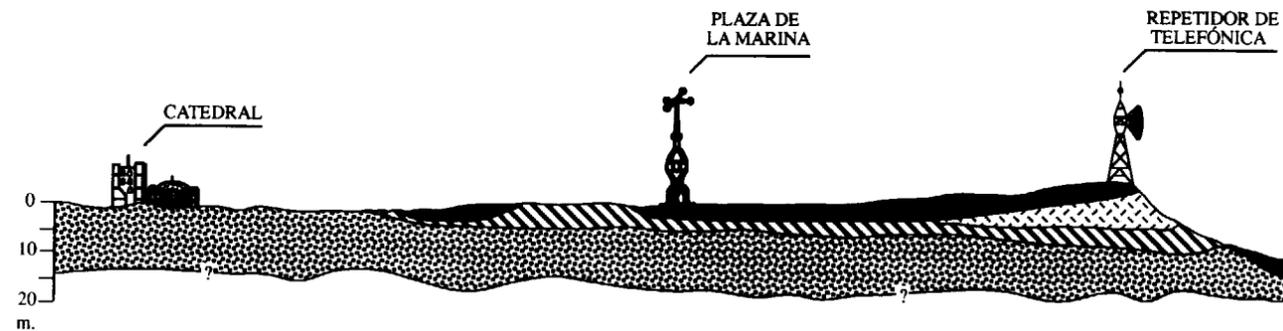


Figura 7.—Esquema geológico-geotécnico del subsuelo de la ciudad.

3.2. Características resistentes

Para llegar a definir las características resistentes de los materiales descritos anteriormente se han realizado ensayos de laboratorio (compresión simple y corte directo), y pruebas *in situ* de penetración dinámica. Se exponen a continuación los resultados obtenidos en cada uno de estos ensayos y pruebas, para cada grupo geotécnico identificado.

3.2.1. Resistencia a compresión simple

Las areniscas de la Facies Zamora, situadas bajo la Facies Entrala, constituyen el que se ha denominado Grupo 0. El intenso proceso de silicificación al que han sido sometidas les confiere una gran dureza y compacidad. Los valores de resistencia a compresión simple obtenidos van a estar muy influenciados por la intensidad del proceso de silicificación y el grado de meteorización que presenten las muestras ensayadas, superando, en ocasiones, los 200 kp/cm².

Los materiales del Grupo 1 situados sobre las areniscas de la Facies Zamora y que constituyen los materiales de transición a la Facies Entrala

propriadamente dicha, muestran como valores más frecuentes de resistencia a compresión simple los comprendidos entre 3 y 7 kp/cm² (fig. 8).

Los materiales englobados en el Grupo 2 muestran valores de resistencia a compresión simple muy heterogéneos que oscilan entre los 2 y los 19 kp/cm² (fig. 8).

Los ensayos disponibles de resistencia a compresión simple del Grupo 4 son únicamente tres

y proceden de un único sondeo (S1). En ellos se observa un fuerte incremento de la resistencia con la profundidad (fig. 8).

El carácter granular de los materiales del Grupo 3 ha dificultado su muestreo, por lo que no se disponen de datos de resistencia a compresión simple para este grupo. Las características resistentes de estos materiales se han estudiado a partir de los ensayos de penetración *in situ*, que se tratarán más adelante.

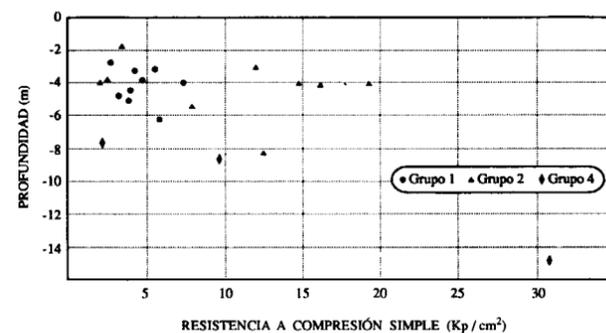


Figura 8.—Valores de resistencia obtenidos en los ensayos de compresión simple en función de la profundidad.

3.2.2. Resistencia al esfuerzo cortante

Las características de cohesión y ángulo de rozamiento interno de los grupos 1, 2 y 4, se han determinado mediante ensayos de corte directo, éstos se han realizado con consolidación previa de las muestras y sin drenaje durante la rotura (c_{cu} y ϕ_{cu}). Los resultados medios obtenidos se muestran en la tabla V.

TABLA V
Cohesión y ángulo de rozamiento interno obtenidos mediante ensayos de corte directo consolidados y sin drenaje (c_{cu} y ϕ_{cu})

	COHESIÓN (kp/cm ²)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO
Grupo 1	0,13	26,6°
Grupo 2	0,77 - 3,3	14,3° - 33,9°
Grupo 4	0,27 - 1,02	24,2° - 33°

Hay que señalar que el número de ensayos realizados ha sido muy reducido y que, por lo tanto, los resultados obtenidos pueden no ser representativos. No obstante, se verifica un comportamiento muy similar al determinado en la resistencia a compresión simple, con una gran variabilidad en los resultados de los grupos 2 y 4. Asimismo, se observa la característica reducción de la cohesión en el Grupo 1 debido a su menor porcentaje de finos (entre el 40 y el 60 por 100 pasa por el tamiz núm. 200 A.S.T.M., fig. 5).

3.2.3. Resistencia a la penetración

— Ensayos de penetración estándar (S.P.T.)

Se ha utilizado esta prueba para el estudio de las características resistentes del Grupo 3 constituido por arenas limosas. Esto es debido, como ya se ha comentado, a la imposibilidad de tomar muestras en esta litología para su ensayo en laboratorio; por lo tanto, en suelos arenosos, los parámetros de resistencia generalmente se obtienen a partir de los resultados de las penetraciones dinámicas tipo S.P.T. La presencia generalizada de niveles freáticos locales en los cuerpos arenosos donde se define este grupo, hace aconsejable la corrección del valor N obtenido en el ensayo según la expresión de Terzaghi:

$N' = 15 + 1/2 (N-15)$. Los resultados obtenidos en este ensayo se encuentran reflejados en la tabla VI.

TABLA VI
Resultados de los ensayos de penetración estándar (S.P.T.)

SONDEO	COTAS	N	N'
4	4,35 - 4,65	83	49
4	5,95 - 6,20	100	> 50
5	4,25 - 4,55	99	57
5	5,55 - 5,75	96	55
6	5,05 - 5,35	59	37

A partir de las relaciones establecidas por TERZAGHI y PECK en 1967, las arenas limosas del Grupo 3 presentan una densidad relativa de densa a muy densa, correspondiéndose con un ángulo de rozamiento interno entre 35 y 40°.

— Ensayos de penetración dinámica tipo Borros

A cada sondeo le ha acompañado, al menos, una de estas pruebas de penetración, lo cual ha permitido obtener una columna litológica interpretativa de cada uno de los niveles litológicos atravesados por la puntaza. En total se han realizado 21 penetrómetros de este tipo. Los datos obtenidos a partir de este ensayo se han tratado según la Fórmula de los Holandeses (SANGLERAT, 1967), con el fin de conocer la resistencia dinámica de los materiales estudiados.

Los resultados más representativos de la resistencia dinámica de los diferentes grupos geotécnicos se han representado en la figura 9. Teniendo en cuenta que la interpretación que se ha hecho de los resultados de los ensayos de penetración dinámica tipo Borros es puramente empírica y que, por lo tanto, hay que considerarlos como una prueba auxiliar a los valores de resistencia obtenidos en el laboratorio, las conclusiones más relevantes que se pueden observar en la figura 9 son: la gran dispersión de los datos obtenidos para el Grupo 1; el Grupo 2 presenta valores de resistencia diná-

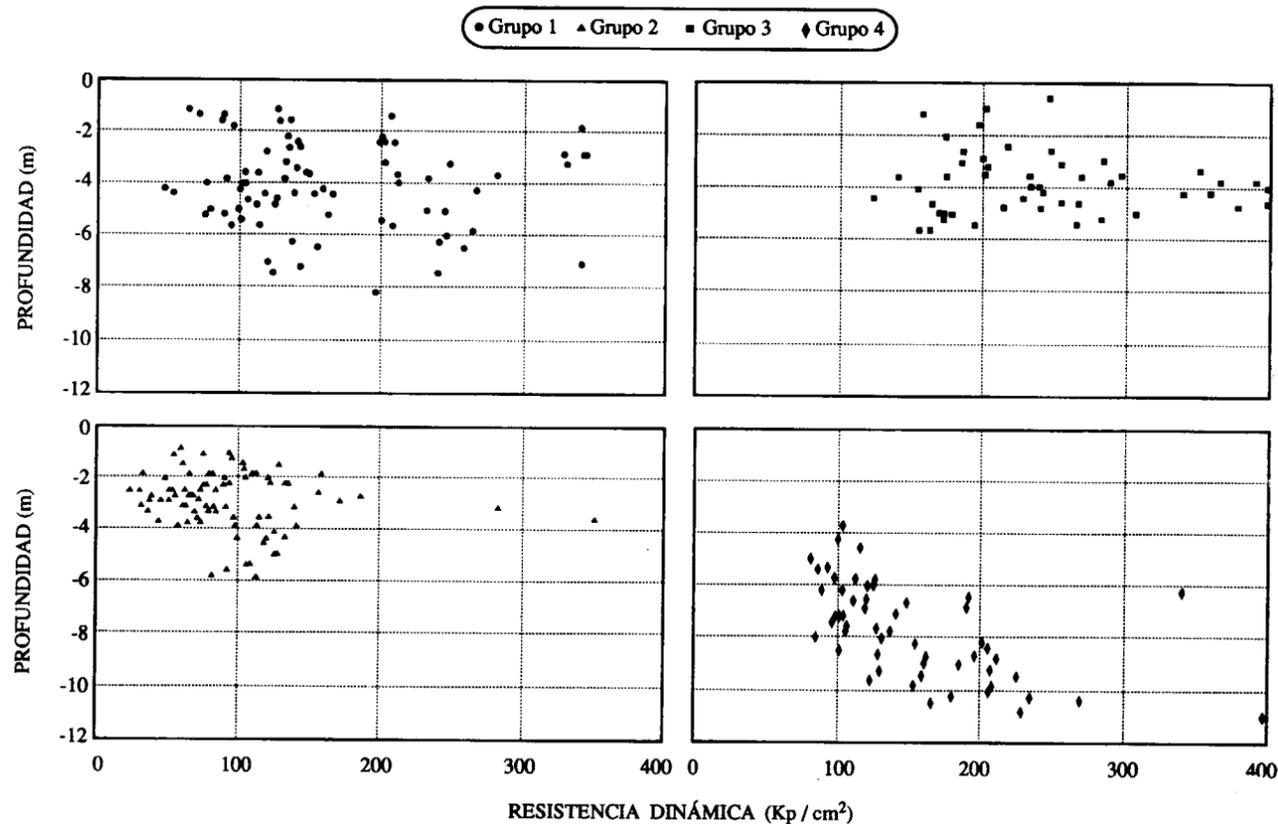


Figura 9.—Representación, para cada grupo geotécnico, de los valores obtenidos en los ensayos de penetración dinámica tipo Borros en función de la profundidad.

mica más concentrados y un valor medio inferior al del resto de los grupos; para el Grupo 3 también se observa una dispersión importante de los resultados, pero se constata un valor medio de la resistencia dinámica más elevado que el del resto de los grupos; por último, en los resultados del Grupo 4 se observa un claro incremento de la resistencia dinámica a medida que aumenta la profundidad, hecho que ya había sido puesto de manifiesto en los resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple realizados en las muestras de este grupo.

3.3. Características expansivas

Las descripciones de las asociaciones mineralógicas, expuestas anteriormente, ponen de manifiesto la existencia de importantes contenidos en arcillas de naturaleza esmectítica, lo cual hace pensar en posibles problemas relacionados

con la expansividad de estos materiales. Las características expansivas de los sedimentos terciarios de la Comunidad Autónoma de Castilla y León ya fueron tratados, de forma general, por JIMENEZ BAUTISTA *et al.* (1992); en este trabajo nos centraremos en los materiales que afloran en el área estudiada.

La valoración del potencial expansivo puede realizarse mediante técnicas indirectas o directas. Las primeras se basan en unos índices o parámetros vinculados con la composición, textura o comportamiento de suelos semejantes. Las técnicas directas miden el hinchamiento producido en las muestras ensayadas o la presión necesaria para impedirlo. En nuestro caso esta valoración se va a hacer fundamentalmente a partir de técnicas indirectas, con referencia a las directas cuando se disponga de datos. Revisiones del alcance y campo de aplicación de estos índices han sido realizados entre otros por

AYALA *et al.* (1986); POUSADA (1984); RODRIGUEZ ORTIZ (1975); SALINAS y OTEO (1989), y SNETHN (1984).

Los índices utilizados en este caso han sido: 1) límite líquido; 2) índice de plasticidad; 3) porcentaje que pasa por el tamiz núm. 200 A.S.T.M.; 4) estimación de la presión de hinchamiento en base al límite líquido y al ILL (humedad natural/ límite líquido), según los criterios de VIJAYVERGIYA y GHZZALY (1973); 5) potencial de hinchamiento en base a la actividad (índice de plasticidad/% < 0,002 mm) y el contenido en arcilla, según los criterios de SEED *et al.* (1962). En algún grupo se dispone además de ensayos Lambe (LAMBE, 1960). Para la obtención del potencial de hinchamiento y el porcentaje de contenido en arcillas se han utilizado las proporciones de fracción arcillosa obtenidas, de forma semicuantitativa, a partir de difractogramas de rayos X. En la tabla VII se muestran estos índices junto con cuatro órdenes de magnitud para calificar la expansividad.

TABLA VII
Valores de los parámetros utilizados para la valoración de la expansividad (selección de parámetros según RODRIGUEZ ORTIZ, 1975)

EXPANSIVIDAD	WL	IP	% # 200	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (kp/cm²) *	POTENCIAL DE HINCHAMIENTO (%) **	% <0,001 mm.
BAJA	< 30	< 18	< 30	< 0,30	0,0 - 1,5	< 15
MEDIA	30 - 40	15 - 28	30 - 60	0,30 - 1,20	1,5 - 5,0	13 - 23
ALTA	40 - 60	25 - 40	60 - 95	1,20 - 3,05	5,0 - 25,0	20 - 30
MUY ALTA	> 60	> 35	> 95	> 3,00	> 25,0	> 30

* Criterio de Vijayvergiya y Ghazzaly (1977).
** Criterio de Seed *et al.* (1962).

La valoración de la expansividad para cada grupo geotécnico, en función de los parámetros anteriormente expuestos, se muestra en la tabla VIII.

Los grupos geotécnicos 1 y 2 muestran un potencial expansivo que puede calificarse en general de medio. Esto se ha corroborado también mediante ensayos Lambe en el grupo 1, que muestran valores *marginales* de Cambio Potencial de Volumen.

El Grupo 3 no se ha incluido en esta valoración debido a su naturaleza areno-limosa, con una

TABLA VIII
Resultados de la valoración de la expansividad en función de los parámetros utilizados

GRUPO	WL	IP	% # 200	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (*)	POTENCIAL DE HINCHAMIENTO (**)	% < 0,001 mm.
1	MEDIA a alta	MEDIA	MEDIA	MEDIA a alta	BAJA	BAJA
2	MEDIA	MEDIA	ALTA	MEDIA a alta	BAJA	MEDIA
4	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA	ALTA a muy alta	ALTA	MEDIA a alta

* Criterio de Vijayvergiya y Ghazzaly (1977).
** Criterio de Seed *et al.* (1962).

proporción muy baja de contenido en arcilla, y que, por lo tanto, no mostrará problemas de expansividad.

El Grupo 4 presenta un potencial expansivo de Alto a Muy Alto. Todos los parámetros utilizados tienden a catalogar esta litología con un riesgo de expansividad muy elevado.

Señalar, por último, que si bien los riesgos de daños por expansividad son patentes, estas valoraciones se han hecho con parámetros o ensayos que implican un remodelado de las muestras. Muchas veces se ha observado que muestras inalteradas apenas hinchan, mientras que si se remodelan resultan expansivas (ESCARIO, 1985). Pensamos que esta situación va a ser particularmente notoria en casos como el de los materiales paleógenos estudiados, los cuales han sido fuertemente sobreconsolidados.

4. CONCLUSIONES

— En la Facies Entrala se pueden diferenciar tres tramos correspondientes a medios sedimentarios distintos tanto por el mecanismo de sedimentación, como por la litología dominante. En ellos se identifican cuatro grupos litológicos: pelitas arenosas y arenas pelíticas típicas del nivel transicional del tramo inferior de la facies; limolitas y limos arcillosos, arenosos y margosos, típicos de los tres tramos, aunque aparece con mayor frecuencia en los tramos inferior y superior, alternando con cuerpos arenosos de granulometría fina y generalmente limosos; y margas

y lutitas margosas típicas y características del tramo intermedio de origen lacustre.

- Geotécnicamente se discriminan cuatro grupos, los cuales presentan características granulométricas y de plasticidad propias que los definen perfectamente. Estos grupos se correlacionan bien con las litologías definidas desde un punto de vista puramente geológico, adaptándose perfectamente al modelo geológico expuesto.
- En base a las características resistentes determinadas, y realizados los cálculos para pequeñas cimentaciones superficiales por zapatas, todos los grupos presentan capacidades de carga en torno o superiores a 3 kp/cm².
- Todos los grupos, excepto el correspondiente a arenas limosas o Grupo 3, presentan cierta problemática en lo referente a su potencial expansivo, siendo el de mayor riesgo el Grupo 4, aunque es importante reseñar que éste es el que más alejado se encuentra de la capital.

Este trabajo ha sido financiado por la empresa I.N.Z.A.M.A.C. (Instituto Zamorano de Materiales de Construcción) y por el Proyecto de la C.I.C.Y.T. PR920069.

REFERENCIAS

- AYALA, F. J.; OTEO, C.; FERRER, M., y SALINAS, J. L. (1986): *Mapa predictor de riesgos por expansividad de arcillas en España. Esc. 1:1.000.000*. ITGE. Madrid.
- CORROCHANO, A. (1977): *Estratigrafía y sedimentología del Paleógeno en la provincia de Zamora*. Tesis Doctoral, Univ. Salamanca. 293 pp.
- CORROCHANO, A.; LEON GOMEZ, C., y QUINQUES AGUT, R. (1980): *Mapa Geológico de España, Esc. 1:50.000. Hoja 397-ZAMORA*. ITGE. Madrid.
- CORROCHANO, A.; LEON GOMEZ, C., y QUINQUES AGUT, R. (1982): *Mapa Geológico de España, Esc. 1:50.000. Hoja 369-CORESES*. ITGE. Madrid.
- ESCARIO, V. (1985): *Síntesis Geotécnica de los Suelos de Madrid y su Alfoz*. Dirección General de Infraestructura del Transporte, M.O.P., 80 pp.

GONZALEZ RODRIGUEZ, M. O. (1994): *Caracterización Geológica y Geotécnica de la Facies Entrala en los alrededores de Zamora capital*. Tesis de Licenciatura, Univ. de Salamanca. 2 vol. 305 pp.

JIMENEZ, E. (1977): *Sipnosis sobre los yacimientos fosilíferos paleógenos de la provincia de Zamora*. Vol. Geod. y Min., 85 (5): 518-524.

JIMENEZ BAUTISTA, A.; CORROCHANO, A.; FERNANDEZ CALVO, C.; PAYAN DE TEJADA, F. J.; ARMENTEROS, I., y BLANCO, J. A. (1992): *Contribución a las propiedades geotécnicas del terciario de la Cuenca del Duero*. III Congreso Geológico de España. Salamanca, 1992, Actas Tomo 2: 374-377.

LAMBE, W. (1960): *The character and identification of expansive soils*. Federal Housing Administration, Report FHA-701. Washington, D. C.

MARTIN-SERRANO, A. (1988): *El relieve de la región occidental zamorana. La evolución geomorfológica del Macizo Hespérico*. Instituto de Estudios Zamoranos Florián de Ocampo (C.S.I.C.), 311 pp.

PICARD, M. D. (1971): *Classification of fine grained sedimentary rocks*. Jour. Sed. Petrol., Vol. 41, pp. 179-195.

POUSADA, E. (1984): *Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada*. Tesis Doctoral. Cuadernos de Investigación, CEDEX. 274 pp.

RODRIGUEZ ORTIZ, J. M. (1975): *Las arcillas expansivas: su estudio y tratamiento*. Bol. Inf. del Transporte y Mecánica del suelo 108, pp. 3-30.

SANGLERAT, G. (1967): *El penetrómetro y el reconocimiento de suelos*. Servicio de Publicaciones del M.O.P. Madrid.

SALINAS, J. L. y OTEO, C. (1989): *Investigación de parámetros geotécnicos en relación con la expansividad de los suelos arcillosos españoles*. Ingeniería Civil, N.º 72, pp. 53-71.

SEED, J.; WOODWARD, R. J., y LUNDGREEN, R. (1962): *Predicción of swelling potential for clays*. ASCE Proc., Vol. 88, pp. 53-87.

SNETHN, D. R. (1984): *Evaluation of Expedient Methods for Identification and Classification of Potentially Expansive Soils*. Fifth Int. Conf. on Expansive Soils. Adelaide. Preprints of papers, pp. 22-26.

TERZAGHI, K., y PECK, R. B. (1967): *Soil Mechanics in Engineering Practick*, 2nd. New York: Wiley.

VATAN, A. (1967): *Manuel de Sédimentologie*. París. Ed.: Technip, 397 pp.

VIJAYVERGIYA, V. N., y GHAZZALY, O. I. (1973): *Prediction of swelling potential for natural clays*. 3th. International Conference on Expansive Soils, Haifa. Proc., Vol. I, pp. 227-236.

Original recibido: Marzo de 1994.

Original aceptado: Julio de 1994.

INFORMACION

Análisis sobre el origen de los materiales arqueológicos del Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid

Por O. PUCHE RIART (*), R. SERRANO VALVERDE (*), M.ª J. BERNARDEZ GOMEZ (*), J. C. GUIASADO DI MONTI (*) y B. CALVO PEREZ (*)

1. INTRODUCCION

En 1992 iniciamos el estudio de las piezas arqueológicas del Museo Histórico Minero D. Felipe de Borbón y Grecia, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, comprobando la calidad de las muestras presentes.

Existían dos colecciones de Arqueología Minera y Prehistórica, ubicadas principalmente en las vitrinas del patio y también en las del torreón norte (1). Asimismo constatamos la presencia, en este último lugar, de un importante conjunto de piezas de la mina del Milagro, en Onís, algunas en relación con las colecciones antes mencionadas.

Se inició la agrupación y estudio de estos materiales, en-

(*) Museo Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

(1) Al principio no sabíamos si estas colecciones coincidían con dos muestrarios de objetos prehistóricos que fueron exhibidos en las Exposiciones de Sevilla y Barcelona, en el año 1929. Sus contenidos aparecían reflejados en los papeles del Museo referentes a sus catálogos y listados: Carpeta I, Legajo núm. 22, hoy en día extraviada. El Dr. López de Azcona nos ha descartado esta posibilidad. Actualmente estas piezas muestran una etiqueta rectangular. En la parte inferior, sobre fondo azul, se aprecia la inscripción *Escuela Especial de Minas*.

cargando el Departamento de Ingeniería Geológica, a arqueólogos profesionales, su dibujo en orden cronológico y según las normas científicas vigentes. Asimismo desde el Departamento se organizó la exposición, en el patio de la Escuela, *Los ingenieros de minas y los naturalistas en la Arqueología española* (2), que se celebró del 4 al 15 de octubre de 1993.

Posteriormente se ha realizado un programa de búsqueda de nuevas piezas en las reservas del Museo y en el edificio de la Escuela. El resultado ha sido la aparición de nuevos materiales. Tras la integración de todo lo recopilado, hemos planteado: el estudio histórico, la clasificación, la catalogación, la limpieza y la conservación de cada pieza. Asimismo se está montando una sección fija de exposición, en una de las vitrinas libres del patio de la Escuela.

2. LAS PRIMERAS PIEZAS ARQUEOLOGICAS QUE LLEGARON A LA ESCUELA DE MINAS DE MADRID

Pese a que Fausto ELHUYAR (1757-1833) era contrario al traslado de la Academia de Almadén, interviene de forma

(2) Para más referencias ver la parte informativa del *Bol. Geol. Min.*, 104 (3), de 1993.

indirecta en la organización de la Escuela Especial de Minas de Madrid. Entre las medidas tomadas por el Director del Cuerpo de Minas figura el envío de los mejores alumnos de Almadén a la Academia de Minas de Freiberg, en Sajonia. Estos eran: Lorenzo GOMEZ PARDO e Isidro SAINZ DE BARANDA (3), así como Joaquín EZQUERRA DEL BAYO, Rafael AMAR DE LA TORRE y Felipe BAUZA (4). De este grupo selecto saldrían los primeros profesores de la Escuela.

Estos pensionados, remitidos a la meca de la minería, recibieron el encargo de comprar amplias colecciones de minerales, rocas y fósiles, para organizar con ellas los gabinetes y museos. También debían adquirir las últimas novedades en libros, así como máquinas e instrumentos de laboratorio, garantizando así una enseñanza de altura.

En 1831, GOMEZ PARDO y SAINZ DE BARANDA compraron por cuenta de la Dirección General de Minas una magnífica colección mineralógica al Depósito de Minerales de la Real Academia de Freiberg (5). En este lote tenemos 309 muestras ordenadas en tres grupos, según sus caracteres exteriores: Cristalografía, propiedades de los minerales compuestos y propiedades de los minerales simples.

Las primeras muestras arqueológicas de la Escuela, que tengamos noticia, aparecen incluidas entre los 2.200 ejemplares comprados por estos mismos alumnos al Dr. ROHATZSCH, por encargo de la Dirección General (6). Pero estas piezas sólo eran consideradas desde el punto de vista mineralógico o geognóstico, ya que por aquellas fechas aún no había despuntado la ciencia antropológica. De esta forma, tenemos un objeto colgante de piedra pulida, en concreto calcedonia de color granate (variedad plasma), procedente de Dos Puentes (Alemania) (7). También había un fragmento lávico, de los muros de Pompeya, hoy extrañado (8). Asimismo, también se encontraba una *piedra de hacha*, de la localidad de Ochsenkopf, junto a Schwarzenberg, en Sajonia (9).

Los ingenieros antes mencionados, junto a Joaquín EZQUERRA DEL BAYO, compraron otra pequeña colección, de 70 ejemplares, principalmente fósiles (10). Por aquellas fechas, la Dirección General de Minas adquirió también

(3) Esto ocurrió en 1829, según VV. AA. (1866). *Festschrift hundertjährigen Jubiläum der Königl. Sächs. Bergakademie zu Freiberg*. Ed. C. C. Meinhold & Söhne. Dresden, p. 259.

(4) Los siguientes comisionados fueron en 1830. *Ibidem*, p. 260. EZQUERRA provenía de la Escuela de Caminos.

(5) Papeles del Museo, Carp. I, Leg. 1.

(6) *Ibidem*, Carp. I, Leg. 2.

(7) Ref. actual 2944 (2917 en el papel, ya que según parece ser inicialmente había dos ejemplares), coincidirían con las piezas núm. 433 y núm. 436 de la colección del Dr. Rohatzsch. La falta de correlaciones entre las numeraciones antiguas y modernas nos imponen unas ciertas limitaciones a la hora de historiar cada pieza.

(8) Ref. 680, de la colección Rohatzsch.

(9) Ref. actual 2433, núm. 703 de la colección del Dr. Rohatzsch y núm. 2182, según el etiquetado posterior de Felipe Naranjo (1857).

(10) Carp. I, Leg. 5.

una colección, de 1582 minerales, a la viuda del Oidor, de la Real Academia de Méjico, Ciriaco de Carbajal (11). Para su revisado y reconocimiento se comisionó a Lorenzo GOMEZ PARDO y a Pedro M.^a ZUBIAGA. Con fecha 4 de julio, elaboraron un informe donde se señalaba la falta de varios ejemplares del catálogo, aunque a continuación indicaban que no podían certificar que realmente faltasen: *por el embrollo que se notaba en las numeraciones de las cajas, por hallarse los números carcomidos, borrados e indescifrables. Asimismo no todos estaban bien catalogados (hay bastantes equivocados). Había 549 ejemplares sueltos, no mencionados en el catálogo*. Estos problemas de partida, tal y como se puede constatar, se incrementan con el transcurso del tiempo. En esta colección se aprecian ya piezas arqueológicas de sumo interés. Así, en el Apéndice al Catálogo (donde se reflejaron los ejemplares sueltos) tenemos una placa circular de obsidiana labrada, considerada como espejo de los indios de Méjico (12). En ese mismo capítulo habría que considerar las obsidianas en forma de *lengüeta de lanza*, halladas en un sepulcro (13) (lámina 1). También un curioso objeto colgante de nefrita labrada (14) y diversos abalorios de materiales muy diver-

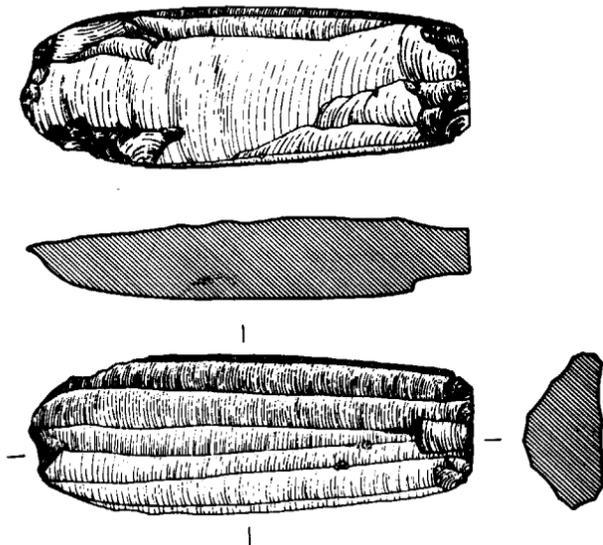


Lámina 1.—Util de obsidiana semielaborado procedente de una huaca precolombina. México.

(11) Carp. I, Leg. 3.

(12) Ref. núm. 1491 de la Col. Carbajal, núm. 2276 de la Col. Naranjo (ver Carp. I, Leg. 20).

(13) Ref. núm. 27 Col. Naranjo. En el catálogo realizado por Nicolás SAINZ, con las muestras existentes en el Museo de la nueva Escuela, esto es a finales del XIX, se consideran a estas piezas como procedentes de la colección de Carbajal? (ver Carp. I, Leg. 17).

(14) Ref. actual 2514. Al menos hay otra interesante pieza de nefrita tallada (de forma cónica con base elipsoidal, no plana) Ref. actual 2512. En el catálogo de la Col. Naranjo tenemos tres nefritas labradas núm. 2184-5-6. Según Nicolás SAINZ pudieran proceder de América y coincidirían con el núm. 742 de la Col. Carbajal.

sos, tales como serpentina (15) o calcedonias de aspectos varios (16). Por último, reseñaremos un fragmento macizo de taza, tallada sobre una roca de textura porfídica (17).

Por R. D. de 23 de abril de 1835 se decide el establecimiento de la Escuela de Ingenieros de Minas en Madrid. La Dirección General de Minas, al mando de Rafael CABANILLAS (1778-1853) nombra a tres de los ingenieros que habían sido pensionados en Freiberg como profesores del Centro. El 3 de mayo llegaron los nombramientos: Rafael AMAR DE LA TORRE, sería el encargado de impartir la Mineralogía y la Geognosia, Joaquín EZQUERRA DEL BAYO se haría cargo de la Mecánica y del Laboreo de Minas, y Lorenzo GOMEZ PARDO de la Docimasia y de la Metalurgia.

Las colecciones mineralógicas seguían incrementándose. El 22 de junio de 1835, AMAR DE LA TORRE y GOMEZ PARDO informan a la Dirección General de Minas sobre la utilidad que supondría la adquisición de la colección de minerales de Fausto ELHUYAR, a su viuda, ya que aquí se dotaba al laboratorio de docimasia de algunas especies que faltaban (18). Asimismo, según la Instrucción N.º 70, de 19 de abril de 1845, dada por la Dirección General, se encarga a AMAR DE LA TORRE la formación de la Colección Geográfica de los Minerales de España, cursándose otra Instrucción, de 28 de julio, a los Inspectores de los Distritos de Minas para que reuniesen muestras mineralógicas y geognósticas de sus territorios (19). En el verano de ese mismo año, Juan SANDOVAL, Encargado de Negocios de Dinamarca, remite al Estado 90 ejemplares de minerales raros del Norte y 50 de fósiles, obtenidos por el Profesor FOREKHAMINER (20). El 24 de septiembre, el Ministro de Estado remite los minerales a la Dirección General de Minas y ésta a la Escuela (21). Por último,

(15) Refs. actuales 2129, 2432 y 2440.

(16) Con la muestra signada como Jaspe (var Heliotropo), Ref. actual 2954, se ha conservado la etiqueta de la Col. Naranjo núm. 129, considerada en el Catálogo como Cuarzo ágata-jaspe, cornerina de color verde y morado, hallada en los sepulcros de los indios en los tiempos de la gentilidad (prov. de Oaxaca, Méjico). Su morfología en escudo, similar a la de las muestras anteriores, nos lleva a señalar un posible origen común para todas ellas.

Otras calcedonias pulidas, de color blanquecino y con un agujero para que pudiesen ser utilizadas como colgantes, corresponden a las Refs. actuales 2973, 2975, 2990 y 2992, todas de Oaxaca. En la 2975 no se cita localidad de origen, pero su color y aspecto es similar a las anteriores, con las que la asociamos.

Por último, señalar un objeto de ágata transparente, también de Oaxaca, Ref. 2948 y, tal vez, las ágatas talladas Ref. 3024.

(17) La taza está compuesta de una pasta negra, vítrea, de carácter ígneo en la que destacan fenocristales de feldespato. Sin Ref. actual, núm. 641-671 de la Col. Carbajal, núm. 136 de la Col. Naranjo.

(18) Tenía en total 68 minerales, ver Carp. I, Leg. 4.

(19) MAFFEI, E. (1877): *Centenario de la Escuela de Minas de España. 1777-1877*, p. 40. Ver asimismo *Bol. Of. de Minas*, de 1844, T. I, p. 88 (núm. 8, agosto 1844).

(20) *Ibidem*, p. 40.

(21) Ver Carp. I, Leg. 6.

señalar que el día 3 de noviembre se pidió una colección a la Superintendencia de Minas de Almadén (22).

Poco después, en 1847, la Escuela de Minas de París regaló a la de Madrid una colección de minerales y rocas de los alrededores de la capital francesa (23). El último curso que explicó AMAR DE LA TORRE fue el de 1847/48 (24), desde su Cátedra de Mineralogía, Geognosia y Paleontología había nutrido de forma exhaustiva los Gabinetes. Le sucedió Felipe NARANJO Y GARZA (1809-1877), el cual ha sido uno de los responsables más señalados del Museo.

NARANJO estimuló mucho las donaciones, al publicar en la *Revista Minera*, a partir de 1852, todas y cada una de las donaciones que se iban produciendo anualmente. Hemos realizado un repaso de estas relaciones y sólo hemos podido reseñar un donativo de tipo arqueológico. Se trata de una roca asfáltica, de color gris claro, que se encuentra tallada en forma de libro, en cuyas pastas se muestra una versión particular, en árabe maronita, del Padre Nuestro (25). La pieza, procedente del Mar Muerto, fue traída por el Profesor de Docimasia y Metalurgia Amalio MAESTE (1812-1872), del que sospechamos otras donaciones como la del Buda de esteatita (26), procedente de China. Este singular personaje, que acababa de sustituir como docente a Fernando CUTOLI, en 1850, había reunido numerosos objetos antiguos en su poder, llegando a ser miembro de la Sociedad Arqueológica de Tarragona. La traducción literal de la oración se la debemos a Lázaro BARBON Y GOMEZ (27), dice así: *Padre nuestro, el que en el cielo; santificado sea el tu nombre; venga tu reino, sea tu voluntad como en el cielo; des nuestro pan, el sustancial alimento nuestro de cada día; perdona a nosotros nuestras culpas, nuestros errores, como nosotros perdonamos al que peca contra nosotros y nos es deudor; y no nos induzcas en tentación (o no hagas prueba de nosotros); mas libranos del mal. Amén.*

Al conjunto de todas las donaciones y adquisiciones anteriores hay que añadir alguna más. Hubo otras remesas de las que desconocemos la fecha exacta de recepción, por ejemplo: los cinco ejemplares enviados por el Museo Nacional de Copenhague (28), los siete adquiridos a OCHALTA (29), así como probablemente alguna colección comprada en París a ELOFFE (30). Por acuerdo de la Junta

(22) *Bol. Of. de Minas*, T. I (1844), p. 169 (núm. 15, diciembre 1844).

(23) MAFFEI, E. (1877): Obra antes citada, p. 42.

(24) PELAYO, F. (1984): *Catastrofismo y actualismo en España*, Lluill, VII, 47-68.

(25) NARANJO Y GARZA, F. (1859). Gabinete de Mineralogía de la Escuela Especial de Ingenieros de Minas. *Rev. Min.*, X, 56-59.

(26) Ref. actual 2449.

(27) NARANJO Y GARZA, F. (1859). Artículo antes citado, p. 57.

(28) Ver Carp. I, Leg. 7.

(29) Ver Carp. I, Leg. 8.

(30) Sin dar una fecha exacta, aluden a este suministro: HERNANDEZ SAMPELAYO, P., y RIOS, J. M. (1949). Ahora hace cien años. Ojeada retrospectiva. *Bol. Geol. Min.*

de Profesores de la Escuela, de 23 de marzo de 1857, se ordenó a Felipe NARANJO aunar todas las muestras para formar dos colecciones mineralógicas con numeración correlativa, elaborando un Catálogo (31), con arreglo al sistema cristalográfico de MÖHS y a la clasificación mineralógica de DUFFRENOY.

En septiembre de 1859, las colecciones estaban a punto de concluirse. Una era de estudio y quedaría en la Cátedra, la otra de exposición, tenía los ejemplares más vistosos e iría a parar al Gabinete. También había colecciones de Geognosia, Paleontología y otras. Los listados de las donaciones anteriores pasaron a Archivo y en el Catálogo nuevo se recogían las numeraciones antiguas. Esto nos ha ayudado a estudiar las piezas existentes a mediados del XIX, lástima que tal orden de cosas no hayan sido mantenidas por sus predecesores, nos hubiesen ahorrado mucho trabajo y actuaríamos con mayor eficacia.

El Museo iba despertando interés. Así el 15 de julio de 1855 fue visitado por el entonces Ministro de Fomento, Francisco DE LUXAN MIGUEL Y ROMERO (1797-1867), acompañado por varios Directores Generales. LUXAN había escrito, en 1841, las *Lecciones de Geología*, uno de los primeros tratados españoles en esta materia. En 1849, por renuncia de Fermín ARTETA se hizo cargo de la recién creada Comisión de la Carta Geológica de Madrid y General del Reino. Por todo lo señalado, tenía un interés especial por la Minería. En la *Gaceta de Madrid*, de 17 de julio, se puede leer el artículo publicado con motivo de la visita (32). De los comentarios vertidos por este motivo hemos querido recoger el párrafo siguiente: *En esta colección (se refiere a la de Metalurgia General) se vieron con especial interés un antiquísimo lingote de plomo puro de la época en que los romanos explotaban las minas de Cartagena, cuyo lingote conservaba bien legible la marca de tan antigua empresa industrial. Llamaba igualmente la atención una muestra de cobre roseta, también del tiempo en que los romanos explotaban el inagotable criadero de Río Tinto* (33). Posteriormente visitaron el Centro (y sus Gabinetes) ALONSO MARTINEZ, así como, el 13 de febrero de 1857, el Ministro MOYANO (34).

3. LOS PRIMEROS UTILES PALEOLITICOS DEL MUSEO

En 1860, el ilustre ingeniero de minas Casiano DE PRADO (1797-1866) trajo desde París un hacha de pedernal, cogida en el *diluvium inferior* del territorio de Amiens, siendo depositada en la Escuela de Minas (35). Suponemos que

(31) Ver Carp. I, Leg. 1-8.

(32) El artículo fue reproducido en la *Revista Minera*, T. VI, 477-479, bajo el título: Visita del Ministro de Fomento.

(33) Parece ser que el lingote descrito está en el Museo, sin Ref. Asimismo, el cobre fundido puede ser el correspondiente a Ref. 1728.

(34) MAFFEI, E. (1877). Obra antes citada, p. 54.

(35) Pequeña nota al respecto se puede leer en *Rev. Min.*, T. XI (1860), p. 716. Este ejemplar está extraviado.

se trataría de un útil de Saint-Acheul, procedente de la segunda terraza del Somme, por lo tanto más moderno que los objetos descubiertos en la primera terraza de este río, cerca de Abbeville, por el párroco BOUCHER DE PERTHES (1788-1868), revolucionando el tema de la antigüedad del hombre (36).

Estamos en la época en que la comunidad científica empieza a admitir que el hombre fósil se incluyese en la recién creada ciencia de la Paleontología. La aparición de útiles de naturaleza humana junto a huesos de animales extinguidos en aluviales y cavernas hizo que se pensase en una mayor antigüedad para la especie humana. De todas formas, como hubo bastante oposición al tema, los organismos científicos tuvieron que tomar postura. Así, en 1859, PRESWICH en Sesión de la Geological Society of London recoge lo proclamado por Charles LYELL al respecto (37):

- 1.º Los utensilios de sílex extraídos en terrenos cuaternarios son obra del hombre.
- 2.º Se han encontrado en terrenos no removidos.
- 3.º Estaban asociados a restos de animales extinguidos.
- 4.º Correspondían a un período incluido en las últimas épocas geológicas, pero anterior al momento en que la superficie terrestre fijó su actual relieve y configuración.

En España la primera noticia amplia que nosotros tenemos de estos sucesos es a través de un artículo de MOIGNO, F., en *El Cosmos*, núm. 3, que fue recogido íntegramente en la *Revista Minera*, con la firma del ingeniero José MONASTERIO (38). De dicha publicación extraemos la frase siguiente: *En los últimos meses de 1859 ha preocupado mucho los ánimos la cuestión de los trabajos de la industria humana, armas o útiles de cuarzo (sílex) encontrados en las arenas de aluvión y en las cavernas huesosas de Francia e Inglaterra, mezcladas con huesos de animales cuya especie se ha perdido.*

En la época de CUVIER, fundados de la Paleontología en 1830, aún no habían sido encontrados restos humanos asociados a animales desaparecidos, por eso no se había planteado aún la polémica del hombre fósil. Por entonces se pensaba todavía que la especie humana era de aparición muy reciente, ocurriendo al final de la sucesión de los distintos períodos geológicos. Los últimos descubrimientos hicieron cambiar esta idea. En el artículo antes mencionado se recoge la traducción de una carta de WORSÆ, J. A. A., al periódico *Atheneum* de Londres donde se reflexiona sobre estos hechos, concluyendo que *La presencia del hombre en nuestros países se remonta a una antigüedad considerable, que ha sido anterior a los*

(36) En el Acheulense las hachas son de menor tamaño que en el Abbevillense y están talladas con mayor destreza, esto es con más filo y mayor rectitud del mismo.

(37) PUCHE RIART, O. (1993). La contribución de los ingenieros de minas y de los naturalistas a la Arqueología española. El inicio de los estudios prehistóricos en España. *Bol. Geol. Minero*, 104(3), 94-128.

(38) MONASTERIO, J. DE (1860). Útiles y armas de pedernal. *Rev. Min.*, T. XI, 55-62.

últimos cataclismos que han modificado profundamente la superficie del suelo. Desde la *Revista Minera* se manifestaron a España las teorías de BOUCHER DE PERTHES antes que fuesen anunciadas por Juan DE VILANOVA y PIERA, en su *Geología Agrícola* (1861), principalmente a través de un artículo de Edouard LARTET (39). En él, tras recordar la presencia de sílex tallados en el terreno diluvial del valle del Somme, indica que este hecho fue: *anunciado por primera vez en 1847 por Boucher de Perthes, reproducido más tarde, en cuanto al depósito de Saint-Acheul, por el doctor Rigollot, este descubrimiento acaba de ser confirmado recientemente por las verificaciones personales y por geólogos de los más eminentes de Inglaterra, como asimismo por la de algunos de los grandes sabios franceses.* Se suma así a la aceptación científica de lo aprobado por la Sociedad Geológica de Londres. A continuación expone las dudas expresadas por algunos sobre la coetaneidad de los objetos prehistóricos y los huesos de animales desaparecidos, ya que algunos autores consideraban que se mezclaban sedimentos antiguos y modernos con las grandes avenidas. Para LARTET la solución era fácil: *Todas estas dudas desaparecerían si se llegasen a comprobar huellas inequívocas de una acción humana cualquiera, sobre los huesos mismos de los animales sepultados con los sílex trabajados por la mano del hombre.* Esto lo verificaría al estudiar cortes y entalladuras sobre piezas de origen auténtico del Museo de Historia Natural de París, particularmente sobre las descritas o mencionadas por CUVIER.

Según TRIGGER, B. (1993) (40), Edouard LARTET (1801-1871) fue: *la principal figura de esos primeros tiempos de investigación del Paleolítico.* Nos cuenta Eric BUFFETAUT (41) que por aquellos años LARTET concentró su atención en el tema del hombre fósil: *Sus excavaciones en Les Eyzes-de-Tallac, localidad del Departamento de Dordoña, aportaron una contribución decisiva al debate, especialmente gracias a un descubrimiento de un fragmento de marfil en el que se veía el grabado de un mamut, lo que demostraba claramente que el hombre había sido contemporáneo de algunos grandes mamíferos desaparecidos* (lámina 2).

En 1864, Edouard LARTE y Henry CHRISTY (42), (lámina 3) estudiaban la caverna de Les Eyzes, comprobando que en su suelo se disponía una brecha osífera, cuyo espesor variaba de 5 a 25 cm, conteniendo junto a distintos huesos humanos y de animales, diferentes artefactos y objetos esculpados. Decidieron dividir el lastrón en placas que fueron remitidas a los principales museos europeos, tal es el caso: del Museo de Historia Natural de París, British Museum, Instituto Imperial Geológico de Viena, Museo de

(39) LARTET, E. (1860). Sobre la antigüedad geológica de la especie humana en la Europa occidental. *Rev. Min.*, XII, 193-200. Reproduce una nota presentada a la Academia de Ciencias de París, el 19 de marzo de 1860.

(40) TRIGGER, B. (1993): *Historia del Pensamiento arqueológico*. Ed. Crítica. Barcelona.

(41) BUFETAUT, E. (1993): *Fósiles y hombres*. Ed. R. B. A. Barcelona, 149-150.

(42) Este individuo, de la Sociedad Geológica de Londres, parece ser que sufragó los trabajos de LARTET.

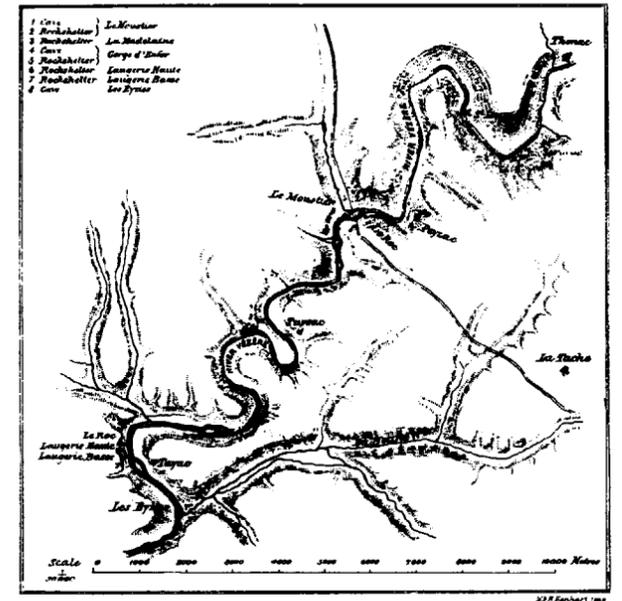


Lámina 2.—Mapa de las principales estaciones prehistóricas del valle del Vézerre, Perigord (Francia), elaborado por LARTET, E. y CHRISTY, H. (1866).

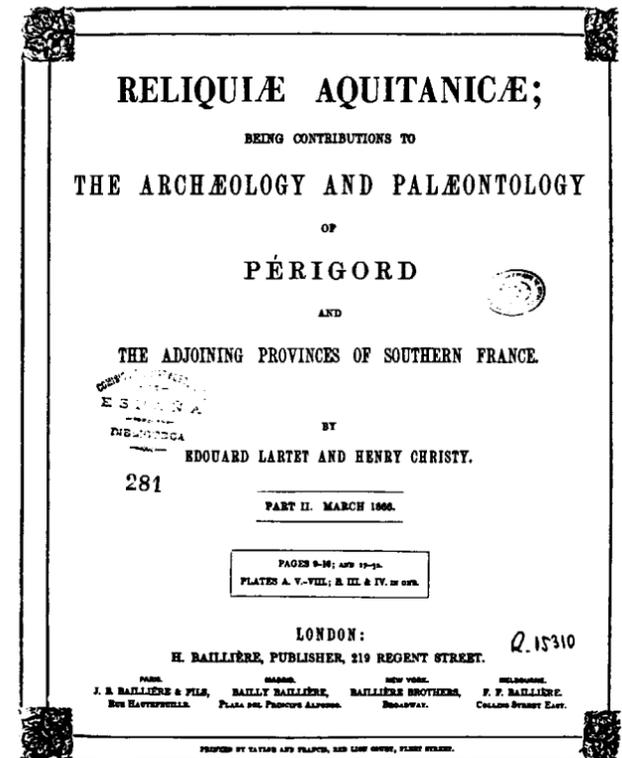


Lámina 3.—Portada de la obra de LARTET, E., y CHRISTY, H. *Reliquiae Aquitanicae* (1866), donde ponen de manifiesto sus hallazgos en el Perigord

Perigeux (capital de la comarca donde se produjo el hallazgo), nuevo Museo Arqueológico de Saint Germain, así como al Gabinete de la Escuela de Minas de Madrid, a través de Casiano DE PRADO (43). La roca recepcionada contenía numerosos huesos de renos y aves, muelas de caballo, fragmentos de útiles de sílex y otros. Dentro de la misma caja venían también: una colección de punzones, así como de cuchillos y hachas de sílex, junto a otros restos de mamíferos. Como señalaría su discípulo Gabriel DE MORTILLET (1821-1828): *Trés-generaux LARTET a enriché la plupart des musées* (44).

Siempre nos llamó la atención la presencia de dos piezas etiquetadas como cuchillos procedentes del Perigord (45), aquella zona en la que LARTET se había dado cuenta de la división, en base a criterios paleontológicos, del Paleolítico. El Perigord comprende la parte central y meridional de Dordoña. En esta zona las calizas cretáceas muestran un gran desarrollo, pero al encontrarse cubiertas por depósitos más recientes sólo afloran en los flancos de los valles excavados por los ríos, como el Vézère. En las cuevas o abrigos de los márgenes fluviales aparecen importantes yacimientos arqueológicos. Destacan en el arte parietal: Font de Gaume y Les Combarelles. En la industria lítica: Laugerie, Le Magdaleine, Le Moustier y La Mouthe. Así mismo, hay que reseñar el abrigo rocoso de Cro-Magnon, donde aparecieron, en 1868, unos enterramientos de cinco esqueletos de una raza de Homo Sapiens del Paleolítico Superior (46).

4. EL DESCUBRIMIENTO DEL PALEOLITICO EN ESPAÑA

En 1850, la Comisión del Mapa Geológico inicia sus trabajos en los Altos de San Isidro, donde años atrás se habían descubierto restos de *Elephas* (47).

Según nos cuentan MAFFEI, E., y RUA DE FIGUEROA, R. (1872) (48) en esta zona trabajaba Casiano DE PRADO buscando el reposo a sus tareas habituales: *recogiendo los restos fósiles que, llevado de su entusiasmo por la ciencia, salvaba de una destrucción inevitable, ayudado en muchas de esas excursiones por el ilustre profesor Sr. Graells. ¡Cuántas veces le hemos visto, celoso guardián de los tesoros paleontológicos, acompañar desde los*

(43) ANONIMO (1864). Magnífico regalo hecho a la Escuela de Minas. *Rev. Min.*, XV, 471-472.

(44) VV. AA. (1872): *Discours et notices nécrologiques sur Edouard Lartet*. Ed. C. Reinwald & Cie. París, p. 14.

(45) Sin Ref.

(46) SEQUEIROS, L. (1992): *Raíces de la humanidad. ¿Evolución o Creación?* Cuadernos F. y S. Ed. Sal Terrae. Madrid.

(47) EZQUERRA DEL BAYO, J. (1844). Algo sobre los huesos fósiles de las inmediaciones de Madrid. *An. de Minas*, T. II, p. 213.

(48) MAFFEI, E., y RUA DE FIGUEROA, R. (1872): *Apuntes para una biblioteca española*, T. II. Imp. M. Lapuente. Madrid. Ver la biografía de CASIANO DE PRADO, pp. 53-61.

desmontes de San Isidro hasta el local de la antigua Escuela de Minas, los mutilados restos que intentaba después restablecer a su antigüedad prehistórica.

Parece ser que PRADO visitó, en 1851 y 1852 París y Londres entrando en contacto con varios de los grandes geólogos europeos, entre ellos PRUNER BEY que le instó a dedicarse a la arqueología. En 1855 volvió a la capital francesa, y según indican los autores antes mencionados, allí fue con objeto de: *conferenciar sobre los fósiles que en sus excursiones había recolectado en las campañas anteriores, comisionándosele para inspeccionar y descubrir la Exposición Universal bajo el aspecto mineralógico y geológico.*

Entre las personas con las que PRADO había trabado buena amistad se encontraba Edouard LARTET. Este señala en 1858 que hacía algunos meses PRADO le había remitido un fragmento de molar de elefante africano, encontrado en el diluvium de los alrededores de Madrid, así como el dibujo de un molar completo, los cuales habían aparecido engastados en la mandíbula de un paquidermo (49).

Poco después ocurriría un hecho fundamental que marcaría el comienzo de los estudios del Paleolítico en España y en ello participaría un hijo de LARTET, L. Nos lo narra PRADO (50): *En la primavera de 1862 vino a Madrid mi amigo M. de Verneuille acompañado del naturalista M. Luis Lartet, hijo del célebre paleontologista, e hicimos una excursión a San Isidro, donde el primero había estado ya conmigo, lo mismo que M. Collomb, en años anteriores, sin que a ninguno de los tres se nos ocurriese entonces ver si había hachas de sílex y esta vez apenas llegado al sitio de excavación donde yo solía ir con mayor frecuencia M. Verneuille fue el que se adelantó a preguntar a los trabajadores que allí se ocupaban, si no había alguna piedra particular. El principal de ellos dijo que sí y nos llevó a su choza... Una de ellas era de sílex de las que deseamos hallar, y se las pagamos, tirando las demás. Mis compañeros le llevaron a París, y sobre él escribieron una nota que fue leída en la Sociedad Geológica de Francia (51). Las palabras exactas que pusieron de manifiesto el hallazgo fueron las siguientes: *la découverte d'un outil de sílex taillé, de forme analogue aux haches du diluvium de Saint-Acheul* (52).*

En la *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid* (1864), PRADO señala con humildad que, en 1850, había visto ya estos sílex en el diluvium de San Isidro, sin que tuviese la menor idea de su carácter antrópico (53):

(49) LARTET, E. (1858). Observations de M. Lartet à propos des débris fossiles de divers Eléphants dont la découverte a été signalée par M. Ponzi, aux environs de Rome. *Bull. Soc. Geol. de France*, T. XV, 2.ª ser, 564-569.

(50) PRADO, C. (1864). *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid*. Imp. Nacional. Madrid, p. 190.

(51) VERNEUILLE, E., y LARTET, L. (1862). Note sur un sílex taillé trouvé dans le diluvium des environs de Madrid. *Bull. Soc. Geol. de France*, T. XX, 2.ª sér., 698-702 (con lámina incluida). Parece ser que esta pieza se conserva todavía en el Museo Arqueológico de Saint Germain.

(52) Ibidem, p. 699.

(53) PRADO, C. (1864). Obra antes citada, p. 188.

Extraño parecerá y a mí mismo me lo parecerá también ahora, no reconociese desde luego que las formas de esas piedras no eran accidentales. Recordemos también que en 1860 nuestro autor había recibido un útil prehistórico de Amiens y que habría visto algunos de ellos en París y Londres. Incluso años antes recogió dos objetos de sílex tallado, que fueron representados en la Descripción de Madrid antes citada (54). Una de estas piezas la hemos podido reconocer, mediante el método analógico-comparativo, entre los materiales dispersos en el Museo de la Escuela (55) (lámina 4). Consideramos a esta pieza, junto a las del Perigord, como de sumo interés histórico.

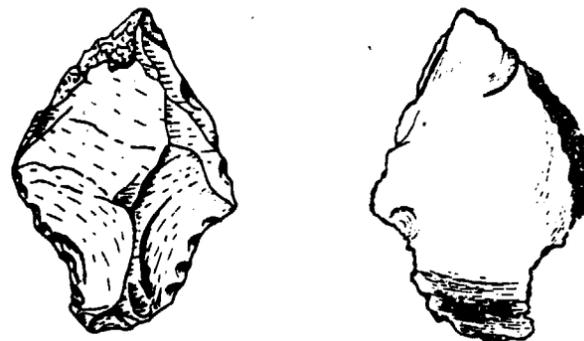


Lámina 4.—Util prehistórico de sílex recolectado por PRADO, C., en 1850, en los Altos de San Isidro. A la izquierda dibujo actual, a la derecha el realizado por PRADO en 1864.

Existen otros utensilios de sílex similares, dos de ellos encontrados en una caja, aparecen bajo la denominación de *astillas de San Isidro* (56). También hay otra muestra procedente de Vicalvaro (57).

Parece ser que la colección de PRADO fue adquirida por la Escuela de Minas. Las Actas de la Junta de Profesores, en sesión del día 20 de septiembre de 1866, recogen el siguiente párrafo: *El Sr. Egozcue* (recién nombrado Profesor de Geología y Paleontología, tras el fallecimiento de Méndez de Lúcar) *manifestó que habiendo sido uno de los encargados de tasar la colección de fósiles de D. Casiano de Prado y habiéndosele comisionado verbalmente la referida orden, deseaba que la Junta le indicase si podía*

(54) Ibidem, p. 189, figs. 87 y 88. Los antecedentes arqueológicos de PRADO llevan a Mariano AYARZAGÜENA SANZ (1992) en su tesis doctoral *La arqueología prehistórica y protohistórica española en el siglo XIX*, UNED, Madrid, a plantear que nuestro autor no se atrevía a presentar como idea propia la del hallazgo del hombre fósil en España, por las circunstancias sociales adversas a la admisión de dicha situación. En apoyo de esta idea ver ANONIMO (1860). *Hacha de pedernal*. *Rev. Min.*, XI, p. 716.

(55) Es una muestra sin ref., se encontraba en una caja junto a otro objeto lítico, con una nota: Núm. 4, Vitrina 9; Cajón 4. No sabemos si PRADO la entregó a la Escuela en 1850, o formaban parte de su colección particular, adquirida por la Escuela hacia 1867.

(56) Sin ref.

(57) Ref. actual 3013.

presentarle afirmación por escrito o no, para resolver la parte de responsabilidad que pudiera cubrirle.

El Sr. Director dijo que veía con gusto que el Sr. Egozcue hubiera tocado esta cuestión, tanto más cuanto la familia del Sr. Prado había hecho varias gestiones acerca de si la Escuela aceptaba o no dicha colección, y en virtud de esto se acordó que el Sr. Egozcue presentara un informe en la primera reunión que se celebrara.

Termina el acta aprobando la Junta la tasación: *Leído el informe del Sr. Egozcue acerca del valor de la colección de D. Casiano, la Junta aprobó la tasación hecha...* (58). Nosotros hemos podido constatar la adquisición definitiva de la misma, aunque no tenemos la relación completa de sus piezas (59).

5. LOS PRIMEROS PASOS DE LA ARQUEOLOGIA MINERA EN ESPAÑA

Hemos podido constatar la presencia de una importante documentación sobre minas antiguas y arqueología minera en las distintas publicaciones mineras de la primera mitad del siglo XIX (60). Pensamos que esto se fundamenta en el hecho de ser la minería la industria histórica por excelencia. La reactivación del sector tras las ordenanzas de 1825, elaboradas por Fausto ELHUYAR, llevó a una búsqueda y puesta en laboreo de minas, así como escombreras, correspondientes a explotaciones de los tiempos más remotos. El encuentro de útiles, obras, hornos y otros vestigios estaba garantizado.

Los primeros datos sobre minería antigua se centran en el Noroeste peninsular. El ingeniero de minas Guillermo SCHULTZ (1800-1877) publicaba en los *Anales de Minas* (1841), *Algunos datos para la historia de la minería de Asturias y Galicia* (61), donde trata principalmente sobre la minería de los metales nobles. Poco después, en 1845, este autor publica *Minas antiguas de Asturias* (62). Retoma el tema, el ingeniero de Saint-Etienne, Antonio ADRIANO PAILLETTE (1809-1858) con los *Apuntes históricos sobre la minería antigua del Principado de Asturias* (63). Este

(58) Agradecemos al historiador Iván RODRIGUEZ la cesión de una fotocopia de este acta. Los originales de la misma se conservan en la E. T. S. de I. de Minas de Madrid.

(59) En los papeles del Museo hay varias referencias, donde esto se puede constatar: Ver Carp. VI, Leg. 2, correspondiente al Catálogo de la colección de fósiles de los terrenos de España, entregado por D. Luis JORDANA al Sr. BASELGA, donde en la reseña a) se indica: Col. comprada a los herederos del Sr. PRADO.

(60) Se trata, principalmente, de los *Anales de Minas*, *Boletín Oficial de Minas* y *Revista Minera*, que hemos revisado de forma general.

(61) SCHULTZ, G. (1841). Algunos datos sobre la historia de la minería de Asturias y Galicia. *An. de Minas*, II.

(62) SCHULTZ, G. (1845). Minas antiguas de Asturias. *Bol. Of. de Minas*, T. II, 219-222.

(63) PAILLETTE, A. A. (1845). *Apuntes históricos sobre la minería antigua del Principado de Asturias*. Dedicados a la Soc. Econom. del Principado. Imp. B. González y Cía. Oviedo. Ver también *Rev. Min.*, T. VI (1855), 289-309, y *Bull. Soc. Geol. France*, T. VI.

autor también escribiría *Investigaciones sobre la historia y condiciones de yacimiento de las minas de oro en el norte de España* (1853) (64).

Enseguida aparecen otros datos relativos a hallazgos. Así en el primer tomo del *Boletín Oficial de Minas* (1844) se cita el descubrimiento de un trozo de barreno romano, hecho con barrena triangular, en el socavón de la Fuente Vieja, de Almadén, y que fue remitido a la Dirección General de Minas para su exposición en una de las salas del Gabinete de Máquinas (65). En ese mismo tomo se recoge un artículo de *El Guadalquivir*, periódico sevillano, donde se da la noticia del descubrimiento de trabajos antiguos en las minas de Guadalcanal (66). En el tomo siguiente R. P. (67) escribe sobre la *mina antigua de la Sima* y Joaquín EZQUERRA DEL BAYO señala la necesaria protección de hornos antiguos descubiertos en algunos escoriales del Campo de Cartagena (68).

En lo que se refiere a la *Revista Minera*, en sus primeros años destacamos un artículo anónimo titulado *Descubrimiento importante* (1858), en el que se trata del hallazgo de un antiguo horno de fundición, en la provincia de Huelva. En él se señala que el Director de las Minas de Tharsis pensaba conservarlo como monumento histórico (69). En estas noticias vemos cómo va naciendo una conciencia de conservación de la memoria histórica. Sobre esta zona también escribieron los ingenieros de minas Ramón RUA DE FIGUEROA, autor de *Ensayo sobre la historia de las minas de Río Tinto* (1859) (70), y Ernest DELIGNY, que realizaría un trabajo titulado *Apuntes históricos sobre las minas cobrizas de la Sierra de Tharsis (Thartesis Baetica)* (1863) (71). En esta obra, describe viejas explotaciones

(64) PAILLETTE, A. (1853). Investigaciones sobre la historia y condiciones de yacimiento de las minas de oro en el norte de España. *Rev. Min.*, T. IV, 450-457, 479-483 y 510-514.

(65) *Bol. Of. de Minas*, T. I. (1844), p. 12.

(66) *Ibidem*, p. ...

(67) Con probabilidad se trata de Ramón PELLICO. Ver R. P. (1845). *Mina antigua de la Sima*. *Bol. Of. de Minas*, T. II, 259-260.

(68) EZQUERRA DEL BAYO, J. (1845). Fenómeno de la cementación cobriza que presentan algunas minas de los antiguos en el distrito de Río Tinto. *Bol. Of. de Minas*, T. II, 438-443.

(69) ANONIMO (1858). Descubrimiento importante. *Rev. Min.*, T. IX, p. 303.

(70) RUA DE FIGUEROA, R. (1859). *Historia de las minas de Río Tinto*. Imp. de la Viuda de Antonio Yenes. Madrid. Se da noticia de esta obra en *Rev. Min.*, T. X, 611-616 y se recoge asimismo una reseña de *La Andalucía* en la revista antes citada, 666-667. En 1868 Ramón RUA escribió *Minas de Río Tinto: estudios sobre la explotación y el beneficio de los minerales*, donde firma como Miembro corresponsal de la Academia de Arqueología y Geografía del Príncipe Alfonso. En 1860 CASTELLANOS trató de crear la Real Academia de Arqueología, intento fallido por la oposición de la Real Academia de Historia. El 3 de julio de 1863 se consiguió por fin el objetivo pasando a denominarse Real Academia de Arqueología y Geografía del Príncipe Alfonso.

(71) DELIGNY, E. (1863). *Apuntes históricos sobre las minas cobrizas de la Sierra de Tharsis (Thartesis Baetica)*. Imp. Vda. Antonio Yenes, 38 pp. Madrid.

y escoriales, con amplias referencias al trabajo de RUA DE FIGUEROA. En otro artículo anónimo de la revista homónima francesa, titulado: *L'exploitation des mines dans l'antiquité* (1864), se indica el hallazgo por parte de este autor de la rueda de noria romana de Santo Domingo.

Respecto a la minería de Cartagena indicar que los principales trabajos se los debemos a Joaquín EZQUERRA DEL BAYO, autor que también publicaría sobre aspectos históricos de Río Tinto. En 1850 escribió *Sobre los escoriales de fundiciones antiguas en España y en particular los de Río Tinto y del término de Cartagena* (72), en lámina adjunta reproduce la figura de los hornos antiguos descubiertos en el escorial Roma, próximo a esta última localidad.

No seremos exhaustivos en el tema sólo señalar que tanto la zona NO con sus criaderos de oro, Río Tinto, como Cartagena, junto a Almadén y Linares, son las cuencas históricas por excelencia, de las que procede buena parte de la bibliografía, así como muchos de los útiles arqueológicos del museo: lucernas (73), ungüentarios (74), cuencos (75) y otros útiles. Aunque también hay piezas de otras localidades (76) (lámina 5).

No podemos terminar este capítulo sin destacar la presencia de piezas procedentes de un yacimiento singular: se trata de los objetos recolectados en la mina del Milagro, de Onís.

Según señala TUBINO, F. M. (1872) (77), PRADO fue el pionero, en España, en la organización de expediciones de Arqueología minera: a su celo debióse el cráneo de la

(72) EZQUERRA DEL BAYO, J. (1858). Sobre los escoriales de fundiciones antiguas en España y en particular los de Río Tinto y del término de Cartagena. *Bol. Of. del Minist. de Comerc., Instruc. y Obras Publ.*, T. IX, 489-511. También hay que resaltar otra obra de este autor: EZQUERRA, J. (1859). *Ensayo sobre la historia de las minas de Río Tinto*. Imp. Viuda Antonio Yenes. 320 p. Madrid.

(73) De Río Tinto y Cartagena.

(74) De Río Tinto.

(75) De Río Tinto.

(76) Se trata de localidades mineras como: Fuenteovejuna, Periana, Lorca, Pola de Laviana y otras. VILANOVA, J., y RADA, J. DE D. (1893) señalan en la *Geología y Protohistoria Ibéricas*, p. 501, que las piezas de Periana fueron donadas por el alumno D. Domingo ORUETA, el cual sería posteriormente profesor de la Escuela.

(77) TUBINO, F. M. (1872). Historia y progresos de la Arqueología española. En *Museo español de antigüedades*, T. I, 1-21. Ed. RADA Y DELGADO, J. DE D. Imp. T. Fortanet. Madrid. El M. A. N. envió a diversas provincias a Juan de Dios RADA Y DELGADO así como a Juan Arturo de MALIBRAN Y AUTET, para que recolectasen materiales para el recién creado museo. Visitaron la cueva del Milagro según recogen en la *Memoria presentada al Sr. Ministro de Fomento, dando cuenta de los trabajos practicados y adquisiciones hechas para el Museo Arqueológico Nacional* cumpliendo con la misión que para ello les fue conferida, pp. 15-17. Madrid. Estos datos también se recogen VILANOVA, J., y RADA, J. de Dios (1892) *Geología y Protohistoria Ibérica*, en la *Historia General de España* de CANOVAS DEL CASTILLO, A., T. I., donde se data el yacimiento como de edad de cobre.

Según TUBINO, F. M., y VILANOVA I PIERA, J. (1868) (79), el yacimiento del Milagro se conoció a mediados del XIX: *La mina señalada en Asturias en 1850 y sobre la cual publicó una nota el Sr. SCHULTZ en 1853 ... corresponde a los tiempos prehistóricos, según la opinión de las personas más competentes*. En artículo anónimo de la *Revista Minera* (1854) titulado *Mina antiquísima de Asturias* (80), donde se describe esta mina. Allí se narra como, desde el punto de vista arqueológico, se produjeron hallazgos importantes. Esto ocurriría con motivo de su puesta en explotación, por los Sres. NORIEGA y FANJUL: *Con motivo de la nueva explotación bien arreglada de este filón cobrizo, ha habido que desatorar o despejar alguna de las labores antiguas y en el fondo de ellas, debajo de escombros se han encontrado huesos humanos, algunas calaveras, muchos trozos y puntas de asta de ciervo, muchos martillos hechos de asta de ciervo en vez de hierro, algunos guijarros de cuarcita traídos del río, escogidos con mucha pericia, porque tienen la forma de elipsoides algo aplastados, pero del todo simétricos, en los cuales se ve una ligera ranura o raimiento artificial, de un dedo o pulgada de ancho, que circunda al guijarro por el medio de su perímetro más corto*.

Dichos guijarros de cuarcita, completamente simétricos, aunque de diversos tamaños y desde 3 hasta 13 libras de peso, podrán haber servido de pesas o también como herramienta o instrumento de golpe...

En 1858, Guillermo SCHULTZ vuelve a dedicar unas líneas a esta mina (81): *...ya explotada someramente en tiempos muy remotos, antes de conocerse el uso del hierro y el acero, por lo que las labores se hacían con caldas* (82) *y después con cuñas y martillos de asta de ciervo y otros mayores de guijarro de cuarcita*. Tenemos, pues, los primeros planteamientos sobre la antigüedad de las minas.

PRADO, C (1864) señala en las últimas páginas de su memoria, que en la Escuela de Minas se encuentra un martillo de asta de ciervo (lámina 6) y que BUSK (en su visita con FALCONER de 1864) le señaló que era de *Cervus elaphus*. Continúa escribiendo PRADO que solicitó a Onís material, recibiendo recientemente los tres últimos martillos de cuarcita que se salvaron y un trozo de asta de ciervo, el único que se salvó, y era el más largo de todos. Por último indica la existencia del cráneo verde que también fue estudiado por BUSK. Pensamos que las piezas

(79) TUBINO, F. M., y VILANOVA, J. (1868). Exploración geológica de Cerro Muriano. En *Estudios prehistóricos*, 97-100. Ed. TUBINO, F. M. Consiste en la memoria que se envió a AMADOR DE LOS RIOS, Director del Museo Arqueológico Nacional, el 29 de mayo de 1867.

(80) ANONIMO (1854). *Mina antiquísima de Asturias*. *Rev. Min.*, T. V, 95-96. Según PRADO, C. (1864), o. c., el artículo es de SCHULTZ, G.

(81) SCHULTZ, G. (1858). *Descripción geológica de la provincia de Oviedo*. Imp. Lib. José González. 138 pp. Madrid.

(82) Las caldas consisten en la aplicación de lumbre de leña adosada a los hastiales, para el resquebrajamiento de las rocas, con lo que se volvían más practicables a cualquier herramienta. La abundancia de ceniza y tiznados serían los vestigios principales de estas tradicionales operaciones de laboreo, aún usadas en algunas minas durante el siglo XIX.

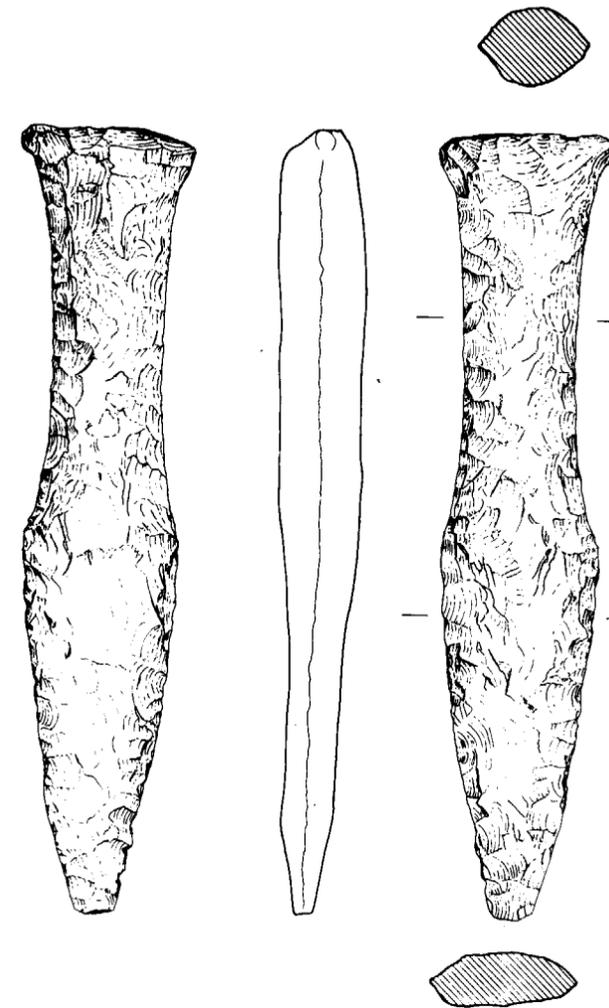


Lámina 5.—Cuchillo de sílex procedente del pueblo minero de Periana (Málaga), donado a la Escuela Especial de Minas por ORUETA, D.

mina del Milagro de Asturias, conservado en el Museo de la Escuela de Minas, cráneo que tiene compañero en el Museo Arqueológico Nacional por haber traído a él otro, encontrado en la misma mina del Milagro, en Onís, el Sr. Rada y Delgado en su último viaje arqueológico. Prado fue también quien reveló la existencia de los martillos de Cerro Muriano, recogiendo algunos en una expedición que contribuyó a su muerte (78). Sin embargo, nosotros no pensamos que PRADO escogiese estos yacimientos por casualidad, ya que tuvieron su importancia en la literatura minera de fechas anteriores. Asimismo parece ser que la procedencia de estas piezas se debe no sólo a PRADO, sino también a Guillermo SCHULTZ.

(78) PRADO visitó Cerro Muriano, en 1866, a la vuelta de su viaje a Canarias, de donde procedía ya enfermo.

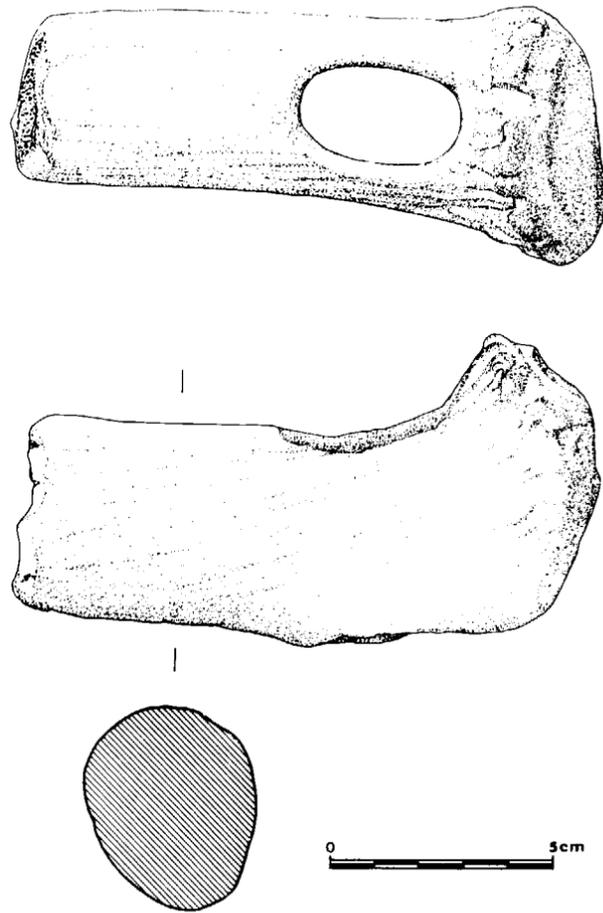


Lámina 6.—Martillo de asta de ciervo, de la mina del Milagro en Onís (Asturias).

principales se deben a SCHULTZ, profesor de la Escuela y pionero en estudiar el yacimiento. El asta grande la aportarí PRADO.

De los artefactos recolectados en Onís, tal vez sean más interesantes los martillos de asta de ciervo, poco abundantes en los museos arqueológicos. Esto tal vez se deba a su rápida sustitución por otros materiales más eficaces. Dichos martillos no fueron los primeros que se encontraron, antes habían aparecido otros en un contexto bien distinto: En 1848, la Academia de Copenhague encargó a WORSÆ, J. J. A.; STEENSTRUP, J., y FORCHAMMER, J. S. (83) el estudio de unos montículos artificiales de conchas, situados a una cierta distancia de la costa de Kaltegat. Entre las valvas y caparazones marinos aparecieron numerosos útiles prehistóricos, tales como: fragmentos de cerámica basta, puntas de flechas y de lanzas,

(83) Se le considera el padre de la Geología danesa.

cuchillos, pilones, morteros e instrumentos de hueso, entre otros, junto a hachas o martillos de cuerno de ciervo (84). Parece ser que WORSÆ consideraba que estos instrumentos de percusión eran anteriores a la época neolítica, ya que no venían acompañados por artefactos de piedra pulida (86). En Onís, en cambio, los martillos de asta de ciervo se mostraban asociados a objetos de la edad del Bronce Antiguo (87). Según PRADO la datación de la mina no estaba tan clara: *El tiempo en que esta mina comenzó a beneficiarse indudablemente es muy antiguo y acaso corresponde al periodo de transición entre la edad de piedra y del bronce ... pudiera también corresponder al fin de la edad del bronce o al principio de la edad del hierro; de cualquier manera que sea, no se puede menos de reconocer, que es acaso la más antigua que hay noticia* (88).

En 1916. Fernando DE LAS BARRAS DE ARAGON, en el *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, T. XVI, 331-332, describe el cráneo y mandíbula encontrados en Onís existentes en la Escuela Especial de Ingenieros de Minas. Según este autor, en la etiqueta (núm. 36 del Catálogo de la Escuela) que acompaña a estas piezas figura que dichos individuos fueron clasificados por BUSK como de raza vasca. El interés despertado por el reconocimiento de estos restos humanos determina su importancia, BARRAS sin embargo no quiso sacar conclusiones.

En una nota anónima publicada por la *Revista Minera* (89), de 1865, su autor señala que tras mostrar, al ingeniero de minas alemán KLEMM, J. G., algunas de las piezas pétreas que se hallaron en la mina del Milagro, señaló haberlas visto idénticas en otra mina antigua, situada en las cercanías de Córdoba.

Tal vez, esto hizo que PRADO, el cual, estamos convencidos, ya había ido especialmente a Onís, fuese a Cerro Muriano, recogiendo algunos martillos de diorita, según indican TUBINO, F. M., y VILANOVA, J. (1862) (90).

Hoy en día, a estos martillos se les da una datación de amplio margen, que va desde los tiempos prehistóricos a épocas bastante recientes, pero entonces se consideraban de una edad intermedia entre Neolítico y Bronce.

La importancia de estos dos yacimientos queda recogida

(84) MONASTERIO, J. (1860). Útiles y armas de pedernal. *Rev. Min.*, T. XI, 55-62.

(85) KLINDT-JENSEN, O. (1975). *A history of Scandinavian Archeology*. Ed. Trames & Hudson. Londres, pp. 71-73.

(86) STEENSTRUP consideraba al contrario que eran neolíticos.

(87) Ver el hacha de cobre del Museo, procedente de Onís, y otras similares expuestas en el M. A. N.

(88) Esta cita es recogida también por TUBINO, F. M., y VILANOVA, J. (1868). Obra antes citada.

(89) ANONIMO (1865). Nota que antecede al artículo de KLEMM, J. G. Noticia sobre los trabajos mineros antiguos en un filón de cuarzo en los Cerros Marianos, en la provincia de Córdoba. *Rev. Min.*, T. XVI, 178-181.

(90) No se conserva ningún ejemplar en la Escuela.

en la obra de SIMONIN, L., *La vie souterraine* (1867) (91), donde se reproduce un martillo de piedra de las antiguas minas de Córdoba. En este libro se indica asimismo su posible antigüedad: *De là l'existence de ces marteaux de pierre, de ces cisaux de bois de cerf qu'on employait à la place de cuivre, trop cher aussi au début pour en faire des outils, et non aillé encore à l'étain*. SIMONIN señala asimismo que estos artefactos descubiertos en Asturias nos llevan a pensar quizá en el criadero de cobre de más antigua explotación en Europa.

6. MUSEO ESPECIAL DE PREHISTORIA Y ARQUEOLOGIA MINERA

Hacia 1864, surge la inquietud, entre los ingenieros de minas, de configurar una sección arqueológica, dentro de los Gabinetes de la Escuela. Suponemos que la maduración de este tema se fundamenta en el hallazgo, en aquellos años, de numerosos útiles, tanto de prehistoria como de arqueología minera. Una minería en pleno desarrollo volvía sus ojos hacia las viejas explotaciones peninsulares, asimismo descubrimientos de importancia en el ámbito geológico, como son los de San Isidro, predispusieron a la profesión para la interpretación de nuestras más arcaicas raíces.

En la *Descripción física y geológica de la provincia de Madrid*, PRADO sugiere que se vaya formando un museo especial, donde él donaría todos los artefactos que había recogido, en sus excursiones y expediciones, tanto en cavidades como en terrenos de *diluvium*. Este autor indicaba, asimismo, que no sólo debían contar los de la Edad de Piedra, sino los de la Edad del Bronce y los de los primeros tiempos de la Edad del Hierro. La reflexión planteada es si PRADO entregó o no los objetos arqueológicos a la Escuela, para el fin previsto, o tal vez fueron adquiridos a su familia incluidos en su colección paleontológica.

Ese mismo año, Ramón RUA DE FIGUEROA (92) escribe un artículo dedicado a los ungüentarios de Río Tinto (93), de los cuales hay varios en el Museo de la Escuela, donde aporta los datos relativos a su análisis químico. En dicha publicación, según las tesis de FOURNET (94), señala que:

(91) SIMONIN, L. (1867). *La vie souterraine ou les mines et les mineurs*. Ed. Lib. L. Hachette et Cie. Paris, pp. 481-483. A la mina de Onís no lo cita por su nombre, aunque todo parece indicar que se trata de ella.

(92) RUA DE FIGUEROA, R. (1864). Composición de un vidrio de la época romana. *Rev. Min.*, XV, 45-49.

(93) En este artículo señala que los lacrimorios de Río Tinto, al igual que los depositados en el museo de la Escuela, tienen forma de matraz de fondo plano y cuello largo, con un reborde o aleta (e incluso coinciden en color). Estos aparecen en las sepulturas de los mineros, acompañados de su lucerna, el óbolo que aún no había recogido el barquero Aqueronte, vasos de arcilla, pateras y otros útiles.

(94) FOURNET, R. (1862). *Du minier, son rôle et son influence sur le progrès de la civilisation*, p. 207.

Es sensible que en nuestra Escuela de Minas no se haya organizado todavía un Museo Arqueológico-Minero, cuando tan numerosos como dignos de estudio serían los elementos que concurrirían a formarla, recogidos en nuestras comarcas mineras explotadas desde los tiempos más remotos.

De todas formas las ideas expuestas por PRADO y RUA tienen un antecedente en lo expuesto por Federico BOTELLA (95), ingeniero de minas Jefe del Distrito de Murcia. Según artículo anónimo en *Revista Minera* éste: *se ocupa de formar en Cartagena un Museo arqueológico en que figuren todos los objetos que se encuentran en las excavaciones y terrenos antiguos, al lado de las colecciones de minerales de aquella sierra*. La propuesta fue bien acogida y hubo el compromiso, de muchos particulares, de dejar en depósito numerosos objetos. Sin embargo desconocemos si con el cambio en la Jefatura cuajó este proyecto.

Dentro de esta nueva tendencia conservacionista surgieron incluso experiencias museísticas locales. Cuenta Felipe NARANJO (96) (1865) que en la mina de San Juan Bautista, de la Sociedad El Fraile, había un verdadero museo de antigüedades romanas, con vasijas, lucernas, bajorrelieves e incluso un ánfora (que fue dibujada por el auxiliar Juan CABALLERO SANCHEZ).

Hay un hecho singular para determinar la llegada de piezas arqueológicas al museo de la Escuela, se trata de la circular enviada por PRADO, como Jefe de la Comisión Permanente de Geología Industrial, en 1865. En ella se solicita a todos los ingenieros de minas Jefes de los Distritos Mineros que busquen y recolecten todos los elementos posibles en relación con la Prehistoria (97). PRADO tras los hallazgos de San Isidro se había volcado en estos temas: No sólo participa en la naciente *Sociedad Antropológica Española* (98) (1865), sino que se involucra de lleno, como ya hemos visto, en el tema de la Arqueología minera, dando indicaciones para que las excavaciones se realicen con criterios estratigráficos.

Dentro de esta efervescencia arqueológico-minera reseñar, por último, un dato importante. Se trata de la lectura pausada del R. D. de 15 de febrero de 1865, donde ALCALA GALIANO, Ministro de Fomento de turno, establece las condiciones para la reorganización de la Comisión del Mapa Geológico, que compartía locales con la Escuela de Minas. Entre los objetivos propuestos figuraba el *estudio y catálogo de los objetos pertenecientes a la antigüedad*

(95) ANONIMO (1862). Museo arqueológico minero. *Rev. Min.*, p. 286.

(96) NARANJO, F. (1865). Memoria sobre el estado de la minería en el Distrito de Murcia. *Rev. Min.*, T. XVI, 384-410.

(97) VILANOVA, J., y TUBINO, F. M. (1871). *Viaje científico a Dinamarca y Suecia, con motivo del Congreso Internacional Prehistórico de Copenhague de 1869*. Imp. Gómez Fuentenebro, 269 pp. Madrid.

(98) ANONIMO (1865). Sociedad Antropológica Española. *Rev. Min.*, T. XVI, 360-364. En este artículo no se cita la participación de PRADO, en cambio sí viene reflejada en la obra de GOZALO, R. (1993). *Libro de Homenaje a Juan Vilanova*. Imp. Dip. Prov. Valencia, p. 55.

que se encuentran en excavaciones de las minas, cavernas y otros trabajos subterráneos. También se encomienda a la Comisión una labor museística: junto a minerales, rocas y fósiles, se debían formar colecciones nacionales de objetos de arte hallados en las minas o trabajos subterráneos. Todavía hace falta una investigación en profundidad de los resultados obtenidos con esta legislación, aunque suponemos que la creación del M.A.N., así como de los Museos arqueológicos provinciales, en 1867, frenaría la tendencia expresa de los mineros a penetrar en el campo arqueológico.

Pensamos que en estas disposiciones legales se ve el espíritu e incluso la mano de PRADO. En la nota necrológica aparecida con motivo de su deceso, José DE MONASTERIO (99) (1866) señala que PRADO fue Comisionado para organizar la parte minera de la delegación española en la Exposición Universal de París, por cuyo motivo: *se había puesto en correspondencia con casi todos los ingenieros de provincias excitándoles su celo y pidiéndoles datos... y objetos de la edad histórica a que tenía una especial afición.* PRADO no viviría para poder contarlo, su amigo Edouard LARTET era el encargado de los temas arqueológicos en la Exposición.

A la Exposición Universal acudió Amalio MAESTRE, presentando junto a las colecciones mineralógicas un conjunto de piezas arqueológicas. Este muestrario fue a parar, como exposición permanente, a la Escuela de Minas de Madrid,

(99) MONASTERIO, J. DE (1866). Nota necrológica (escrita por el Jefe de Redacción). *Rev. Min.*, T. XVII, 416-419.

reconociendo Manuel DE ASSAS Y EREÑO (1867) (100) que ésta fue una de las pioneras en España.

7. CONCLUSIONES

Entre los objetos arqueológicos de Museo nos encontramos con pocas piezas, pero algunas muy selectas. Unas proceden de los más conocidos yacimientos, otras han sido donadas por personajes relevantes.

Tenemos constancia absoluta de la estructuración de un museo arqueológico o de una sección especial de prehistoria dentro de los gabinetes de la Escuela, al menos de 1867. Asimismo hay datos relativos a su solicitud, así como la recopilación de piezas al efecto.

La falta de papeles nos ha impedido documentar, en algunos casos, la procedencia de las piezas. En otros casos, en cambio, sí ha sido posible averiguar su origen, así como detectar algunas ausencias, cosa habitual con el transcurso de un tiempo tan dilatado y con tantos episodios acontecidos (traslados, guerras y otros).

Los estudios paralelos a la confección del catálogo de piezas han permitido comprobar una amplia concurrencia histórica entre los ingenieros de minas y los arqueólogos. Algunos de sus frutos los podrán apreciar Vdes. en las nuevas vitrinas del Museo.

(100) ASSAS, M. (1867) *Santander*. En *Crónica General de España*, T. XI, p. 29. Madrid.

La aportación científica y tecnológica de Jorge Agrícola (1494-1555)

Por F. J. AYALA CARCEDO (*)

Se cumple este año el *Quinto Centenario* del nacimiento del alemán Georg Bauer, que latinizó su nombre para acordarlo con la lengua en que escribió, el latín. Es ésta una buena ocasión para recordar su vida y su obra, que analizaremos sucintamente dentro de la circunstancia histórica en que le tocó vivir.

AMBIENTE Y BIOGRAFIA

La vida de Agrícola se desarrolla en pleno Renacimiento, inmediatamente después del Descubrimiento de América.



Quid Medici possent manibus? quas iungere plagas
Vlceribus fordes, signa mouere loco?
Exitit hic solus qui pondera, viscera Terra
Rimatus, nobis bella metalla fodit.

Georgius Agricola

Figura 1.—Jorge Agrícola, médico, geólogo, minero, metalúrgico y político alemán renacentista, autor del *De Re Metallica*.

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España.

Este Descubrimiento induce una corriente de cambio de las rutas comerciales, cuyo centro de gravedad pasa del Mediterráneo al Atlántico acelerando la decadencia de las Repúblicas italianas y el comercio con Asia y África por la vía mediterránea. Así mismo, hace crecer el comercio internacional y la demanda de metales preciosos necesaria para ello, en consonancia con el concepto mercantilista vigente que cifraba el objeto de la política económica en la posesión de dinero. Esta necesidad de metales preciosos será aumentada por las demandas derivadas de la evolución política en el sentido de aumentar el poder de los Estados Nacionales naciendo y las guerras de religión producidas por el cisma de la Reforma en la Europa católica, demandadores también del resto de los metales.

Socialmente, Europa vive entonces un proceso de cambio profundo. Durante toda la Baja Edad Media el crecimiento de las ciudades y el comercio ha enriquecido a la burguesía y aumentado el poder de los artesanos agremiados, resquebrajando el poder de la nobleza feudal, y sirviendo de base de apoyo a las monarquías absolutistas naciendo. La repercusión cultural de estos hechos supondrá una auténtica Revolución Cultural, el Renacimiento, generadora de muchas de las estructuras y valores culturalmente vigentes en nuestros días. A la preocupación religiosa característica de la Edad Media, la va sustituyendo una nueva perspectiva, la humanista, que coloca al hombre en el centro del mundo, ironía de la vida, en las vísperas del *De Revolutionibus* copernicano. Para apoyar esta mutación, el Renacimiento cuenta con dos apoyos fundamentales: una lengua culta común, el latín, y una tecnología cultural revolucionaria: la imprenta de Gutenberg de 1450. De ambos sabrá Agrícola hacer un uso magistral al servicio del progreso científico-técnico, una idea que se está fraguando tímidamente y que eclosionará a fines del XVII, tras la Revolución Científica de Galileo, Newton, Descartes, Harvey y otros sabios.

En este ambiente, el joven Bauer estudia lenguas antiguas, filosofía y teología en la Universidad de Leipzig hasta 1518, ejerciendo después de profesor en Leipzig y Zwickau. Esta experiencia didáctica, le serviría indudablemente para su obra posterior, igualmente su dominio del latín. De hecho, su primer libro fue una Gramática latina.

En aquella época, Italia, cuna del Renacimiento, era la meca cultural. Agrícola viajó allí en 1523, estudiando medicina con el famoso anatomista Berengario de Carpi primero en Bolonia, después en Padua, y permaneciendo en Venecia de 1524 a 1526. Allí, gracias a su dominio del griego, idioma culto de la Antigüedad, pudo estudiar la obra de Galeno, puesta a disposición de los estudiosos gracias a las ediciones de los clásicos de la imprenta de Aldo Manuzio. Es probable que aquí se diera cuenta cabal de la enorme importancia de la imprenta. Al cabo de unos tres años establecería contacto con la casa Froben de Basilea y con el humanista Erasmo de Rotterdam, director cultural de la misma con el cual mantendría una buena relación y que valoraría positivamente las aportaciones de Agrícola.

En 1526, vuelve a Zwickau como médico, y al siguiente año es nombrado médico oficial de Joachimstal. Esta ciudad, que conocemos por la pechblenda que permitió a los Curie el aislamiento del Radio, a unos 80 kilómetros de Freiberg (en el Erzgebirge, los Montes Metálicos), se había fundado hacía 11 años a consecuencia del descubrimiento de metales preciosos en los Sudetes. El conjunto de los Montes Metálicos y los Sudetes era en aquella época el principal distrito minero metálico de Europa, donde se daban cita las técnicas más novedosas, de la prospección a la metalurgia, pasando por la minería.

Agrícola, ya no se movería de la zona minera, solamente en 1534 se trasladó a Chemnitz al mismo puesto. Hacia 1545, comenzó su actividad política como burgomaestre de esta ciudad, desempeñando diversas misiones para los Duques Mauricio y Augusto de Sajonia, una de las cuales le traería a España ante Carlos V. Sus buenas relaciones con el poder político, favorecieron la publicación de sus obras.

Agrícola no se decantó por la Reforma, sino que la combatió con su *De traditionibus apostolicis* y ello supuso, en el ambiente enconado de odios religiosos que se vivía, que les fuera negada sepultura en Chemnitz a sus restos durante cinco días, siendo trasladado a la catedral católica de Zeitz donde está enterrado.

LAS APORTACIONES CIENTIFICAS

Sus aportaciones geológicas fundamentales, fueron en el campo de la Mineralogía. Esta ha sido una constante entre los mineros que se han ocupado de la Geología. Así podrían citarse, sólo en España, los casos de Juan José Elhúyar, probable autor del primer tratado geológico escrito en España, la *Oryctología*, y de Andrés Manuel del Río, la *Oritognosia*, el segundo, de 1795, ambos tratados sobre Mineralogía escritos a fines del XVIII (PUCHE y AYALA, 1992). La razón de este hecho hay que buscarla en la estricta necesidad para el minero de identificar los minerales existentes en el yacimiento.

Previamente a Agrícola, que como buen erudito humanista examina todas las aportaciones anteriores a él, cabe citar a varios autores. Ante todo está la obra de Teofrasto, un discípulo de Aristóteles, autor del *De Mineralibus*, en el que describe en base a los caracteres externos unas sesenta especies diferentes (HOYOS, 1990). El médico

griego Dioscórides, del siglo I, describe las sustancias minerales con supuestas propiedades medicinales y añade unas pocas nuevas a las de Teofrasto, como la blenda o el esquistos. Plinio, autor romano del siglo I, dedicó varios libros de su *Historia Natural* a minerales, metales y piedras. Así, el XXXIII describe principalmente oro, plata y mercurio; el XXXIV los otros metales y sus minerales; el XXXVI las piedras y tierras y el XXXVII las piedras preciosas. Existe, como en Dioscórides, una preocupación notable por mostrar los usos medicinales de estas sustancias.

En la Edad Media, se sigue en gran medida lo apuntado por Plinio y los griegos, que Isidoro de Hispalis (530-636) sintetizaría en sus *Etimologías*. Hay sin embargo, una presencia importante de Aristóteles con su estéril teoría de los cuatro elementos, aire, tierra, agua y fuego, y de las aportaciones de los alquimistas, verdaderos precursores de la química con su idea de la transmutación y sus aportaciones a la técnica de operaciones. Cabe señalar a Avicena en el siglo XI, con su clasificación en piedras, tierras, metales, fósiles sulfurados y sales, y a Alberto Magno (1200-1280) en el siglo XIII.

Ya en el Renacimiento, cabe señalar al italiano Biringuccio (1480-ca 1539), contemporáneo de Agrícola, cuya influencia sobre Agrícola en el terreno metalúrgico sería fundamental, tal y como Agrícola reconoce honradamente, que en su *Pirotechnia* (1540) expone sus ideas mineralógicas.

Las aportaciones de Agrícola a la Mineralogía, comienzan con el *Bermannus, sive De Re Metallica Dialogus* (1530) y se exponen de forma sistemática en el *De Natura Fossilium* en 1546 (los minerales serán denominados fósiles hasta comienzos del XIX).

Antes de valorar lo que significa la aportación de Agrícola, es necesario darse cuenta de que las bases científicas de la Mineralogía sólo alcanzan un desarrollo real a partir de 1784, con Haüy (1743-1822) en la Cristalografía y de la mitad del XVIII en la Química, con Lavoisier (1743-1794),

Vena profunda lata A. Vena profunda angusta B.



Figura 2.—Filón metálico (De Re Metallica, 1556).

Proust (1754-1826) y Dalton (1766-1844) Estos hechos dejaban pocas vías a la Mineralogía y Petrología, aparte de la descriptiva. En este sentido, y basándose en la observación más que en el criterio de autoridad, algo muy propio de la actitud renacentista, Agrícola utiliza las siguientes propiedades: color, brillo, transparencia, densidad, dureza, fragilidad, olor, sabor, forma exterior y aspecto, solubilidad, fusibilidad, textura, friabilidad, compacidad y sequedad.

Su clasificación divide los minerales en simples y compuestos, y los primeros en Tierras, Sales, Piedras y Metales. De la profundidad de su trabajo da idea el que use 573 nombres latinos y 115 griegos, clarificando confusiones existentes, un tema que desarrolló en su glosario Latino-Alemán mineralúrgico y metalúrgico *Rerum Metalliarum Interpretatio*. Asimismo, aporta veinte nuevos minerales, lo cual es un avance enorme habida cuenta de que se conocían poco más de 60. Asimismo, caracteriza al Bismuto y Antimonio como metales. Su trabajo debe mucho probablemente al conocimiento empírico realizado por anónimos mineros de las cuencas alemanas contemporáneas del autor, y especialmente a su amigo Lorentz Bermann, que dio su nombre al *Bermannus*. El libro tiene gran interés también como fuente geográfica de yacimientos en todo el mundo conocido; este aspecto sería ampliamente tratado en *De Veteribus et Novis Metallis*. Las ideas de Agrícola serán utilizadas hasta la clasificación de Werner (1750-1817), ingeniero de minas-geólogo de Freiberg, en 1774, que ya incorpora algunos criterios químicos.

En el tercer libro del *De Re Metallica* (1556), expone su *geología* de yacimientos sobre filones y masas. Previamente, en *De Natura eorum qui effluunt ex terra* (1546), sugiere el carácter de precipitados por fluidos ascendentes de los minerales filonianos, descartando las supersticiones y mitos existentes sobre el origen de los minerales.

Sus ideas sobre los procesos geológicos, se exponen en *De Ortus et Causis Subterraneorum*, también de 1546, muy crítica con las supuestas intervenciones de causas sobrenaturales en la evolución del relieve p.e. donde asume las observaciones de Avicena sobre la erosión.

LAS APORTACIONES TECNOLOGICAS

La tecnología renacentista no supuso en general una Revolución Tecnológica respecto a la Edad Media, período poco brillante en lo científico, pero relativamente innovador en lo tecnológico por la necesidad de suplir la escasez de fuerza de trabajo que lo caracteriza frente a la Antigüedad grecorromana con su sistema esclavista. El Renacimiento, sí supuso, sin embargo, una amplia difusión de las innovaciones medievales.

En este contexto general, caracterizado por el uso de energías naturales (tracción animal, eólica e hidráulica), el auge renacentista de la minería metálica, supuso un hito importante, ya que la evolución tecnológica, tal y como modernamente ha mostrado Schmoekler, está ligada al auge económico de los sectores respectivos. La minería y la metalurgia, tecnologías de alto nivel de integración, suponen el uso de múltiples tecnologías simples: arranque, carga, transporte, drenaje, trituración, separación me-

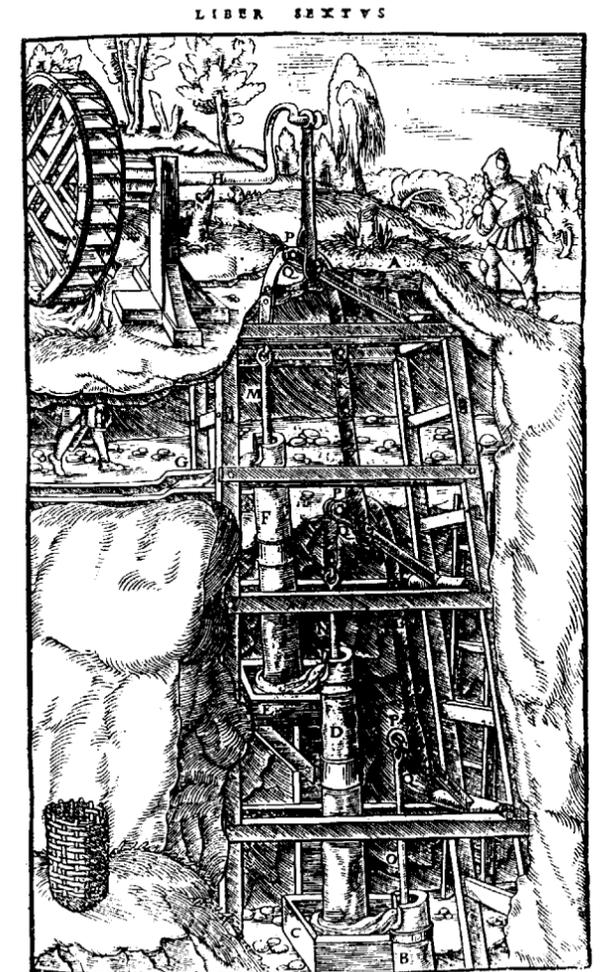


Figura 3.—Sistema de desagüe de mina con bombas en serie (De Re Metallica, 1556).

cánica, térmicas, operaciones de fundición, ventilación, seguridad, organización, etc. Habida cuenta de su carácter histórico de primeras verdaderas industrias, han sido no sólo el exponente primero de la evolución tecnológica industrial de un país, sino también el sector donde se han producido muchas innovaciones, pudiendo citarse p.e., las primeras máquinas de vapor, aplicadas al drenaje de minas, las de Savery en 1700, o la primera locomotora de vapor en 1815, ambas en el Reino Unido.

Estas consideraciones son necesarias para comprender la importancia histórica del tratado *De Re Metallica*, ya que *estamos en presencia no sólo del más importante tratado tecnológico minero metalúrgico de su época, sino probablemente del más importante tratado tecnológico escrito hasta entonces*, y sólo por ello el nombre de Agrícola merece un lugar de honor en la Historia de la Tecnología. Agrícola ocupa en este sentido un lugar equivalente al de Vitruvio para la tecnología romana, y su tratado es un



Figura 4.—Lavado de minerales con canales (De Re Metallica, 1556).

precursor en lo tecnológico, y en el uso sistemático de los grabados (291), de la Enciclopedia de Diderot de 1751-1772. Incluso es un país tan adelantado en su época como China, sólo en 1637 Sun Ying-Hsing produciría un tratado equivalente, *La explotación de las obras de la naturaleza* (NEEDHAM, 1956).

La preocupación de Agricola por la Tecnología en esa sociedad en transformación que es la renacentista, es paralela a la de Leonardo da Vinci (1452-1519), de una generación anterior a la suya, aunque Leonardo es ante todo un inventor, y Agricola es el testigo, organizador y difusor del saber técnico de los mineros alemanes y de la metalurgia alemana, italiana y quizá española (Bartolomé Pérez de Veiga publica en 1530 *De los Metales*). En este sentido, la obra de Agricola es deudora de dos obras precedentes y en diverso nivel. La influencia del italiano Vannoccio Biringuccio sobre la parte metalúrgica a través de su obra *De la Pirotechnia* (1540), es muy amplia y es reconocida por Agricola. La influencia del popular manual de



Figura 5.—Hornos metalúrgicos (De Re Metallica, 1556).

minería de Ulrich Rülein von Kalbe (1465/1469-1523), médico de Freiberg, el *Bergbüchlein* (1500), probablemente existió, pero una comparación de los mismos, pone de relieve la gran diferencia en extensión, sistemática y profundidad a favor de Agricola (FAUL, H., y FAUL, C., 1983).

De Re Metallica, publicado en 1556 póstumamente por Froben, de Basilea, se compone de doce libros, que tratan de las materias siguientes:

- 1.º Historia de la Minería en la Antigüedad y la Edad Media.
- 2.º Prospección minera.
- 3.º Geología y Yacimientos.
- 4.º Topografía minera de concesiones.
- 5.º Arranque y avance de labores mineras y topografía de interior.
- 6.º Extracción, drenaje, herramientas y máquinas.
- 7.º Métodos de ensayo y hornos de copelación.
- 8.º Mineralurgia: trituración, cribado, lavado, etc.

- 9.º Metalurgia: hornos.
- 10.º Metalurgia: afino del oro.
- 11.º Metalurgia: copelado de la plata.
- 12.º Sales, asfalto y vidrio.

Se trata de una perspectiva integral de la industria minero-metalúrgica, de la prospección a la metalurgia. Se tradujo rápidamente al alemán (1557) y al italiano (1563). El *De Re Metallica* fue el libro de referencia durante dos siglos, gracias al frecuente conocimiento del latín, idioma en el que está escrito.

Es sorprendente la falta de traducción al español hasta 1972, habida cuenta del carácter minero del país, de la potente minería americana y de la estrecha colaboración minera hispano-alemana desde los Austrias.

Es revelador del talante de Agricola un párrafo del *De Re Metallica*: «...yo no he escrito cosa alguna que no haya visto o leído o examinado con diligencia precisa». Una ruptura clara con el talante especulativo anterior, y en plena concordancia con el humanismo renacentista.

Los metalúrgicos españoles realizarían con posterioridad importantes aportaciones en lo relativo a metales preciosos, tales como el método de los patios de Bartolomé Medina en 1555, o el método de cazo y cocimiento de Alonso Barba, cura de Potosí, en 1640, para la amalgamación de la plata, siguiendo el camino que ya desde la Edad Media trazaron los anónimos creadores de la farga catalana.

Agricola había realizado previamente otra aportación de interés para la Ciencia y la Tecnología en cuanto a las unidades de medida, el *De Mensuris et Ponderibus* de 1533 en que analizaba los pesos y medidas europeas.

Agricola fue consciente del problema ambiental que planteaban las labores minero-metalúrgicas. Así, dice, refiriéndose a los argumentos de los detractores de la minería por razones ambientales: «... argumentan (ellos) que se cortan los bosques ... Y cuando los bosques han desapa-

recido, son exterminados animales y aves ... Además, cuando se lavan los minerales, el agua utilizada envenena los arroyos». En apoyo de la Minería, sostiene la imposibilidad de Civilización sin metales y la posibilidad de reutilización agraria de las zonas deforestadas.

Como médico, escribió un tratado sobre la peste: *De bello Turcis inferendo*.

Hombre de su tiempo, tuvo las limitaciones propias del mismo, y al igual que cien años más tarde haría Newton, dedicó tiempo a la búsqueda de la piedra filosofal, escribiendo, también, un trabajo sobre ella: *De lapide philosophico*.

REFERENCIAS

BECHER (1819): *Die mineralogen Georgius Agricola und G. A. Werner*. Freiberg.

DARMSTAEDTER, E. (1926): *Georgius Agricola Leben und Werk*. München.

FAUL, H., y FAUL, C. (1983): *It began with a stone. A History of Geology*. Wiley and Sons. N. Y.

HOFFMANN, R. (1898): *Dr. Georgius Agricola*. Glauchau.

HOYOS, M. A. (1990): *Historia de la Mineralogía*. In *Historia de la Geología*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid.

JACOBI (1889): *Der Mineralogen Georgius Agricola und sein Verhältnis zur Wissenschaft seiner Zeit*. Werdau.

NEEDHAM, J. (1956): *Science and Civilization in China*, vol. 2, Cambridge University Press.

PUCHE, O., y AYALA, F. J. (1992): *La «Orythologia» de Juan José Elhúyar (1754-1796) y la «Oritognosia» de Andrés Manuel del Río (1764-1849), primeros tratados geológicos escritos por españoles, en América*. Boletín Geológico y Minero. ITGE, Madrid.

Noticias

PROGRAMA INTERNACIONAL DE CORRELACION GEOLOGICA (P.I.C.G.)

Desde 1973, en que fue establecido este programa por parte de la International Union of Geological Sciences (I.U.G.S.) y la UNESCO, se han venido realizando diversos estudios interdisciplinarios, promoviendo la cooperación internacional. Sus objetivos generales abarcan la correlación geológica en sus diferentes facetas, la identificación de potenciales recursos minerales y energéticos y el desarrollo de nuevas técnicas de investigación, todo ello con vistas a la transferencia de conocimiento a los países subdesarrollados.

El programa se lleva a efecto por medio de proyectos concretos, que deben cumplir criterios de máximo interés científico, con objetivos prácticos definidos, relevantes global o regionalmente, con participación internacional y con resultados previsible a corto plazo. El programa trata de servir como base a la iniciación de los proyectos, de forma que no es la fuente de su financiación.

Nuevos Proyectos 1994

- N.º 346. *Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas.*
Coordinadores: R. G. Garetly & E. A. Levkov.
- N.º 363. *Crustal Growth and Mineralisations during the Lower Proterozoic in Sub-equatorial Africa.*
Coordinadores: M. Kanika & S. Master.
- N.º 364. *Geological correlation of volcanic arcs and related ophiolites suites in the Circum-Caribbean Region.*
Coordinador: G. Draper.

- N.º 366. *Ecological Aspects of the latest Precambrian (Post-Ediacaran) and Early Cambrian Biotic Radiation.*
Coordinadores: A. Zhuravlev & R. Wood.
- N.º 367. *Late Quaternary coastal records of rapid change: application to present and future conditions.*
Coordinador: D. B. Scott.
- N.º 369. *Comparative stratigraphic evolution of Perithyan Rift Basins.*
Coordinadores: W. Cavazza, A. Robertson & P. Ziegler.
- N.º 371. *Structure and correlation of the Precambrian in NE Europe and the North Atlantic Realm (COPENA).*
Coordinador: R. Gorbatshev.
- N.º 374. *Palaeoclimatology and Palaeoceanography from Late Quaternary and Holocene laminated sediments: a global joint approach using marine and lacustrine sediments with special emphasis on the periods: 2000-0 yr b.p.; the last glacial maximum to beginning of the Holocene (ca. 25000-10000 yrs. b.p.) and isotope stage 5.*
Coordinador: A. E. S. Kemp.
- N.º 376. *Pre-Pangea analysis of Middle Proterozoic and Paleozoic interactions of Laurentia and Gondwana.*
Coordinadores: V. A. Ramos, F. Hervé & J. D. Keppie.
- N.º 378. *Circumalpine Quaternary Correlations.*
Coordinador: C. Sclüchter.

PATRIMONIO ARQUEOLOGICO-MINERO DEL MUSEO DON FELIPE DE BORBON Y GRECIA Exposición Temporal

Organizado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Museo Histórico-Minero Don Felipe de Borbón y Grecia.

Se desarrollará del 4 de diciembre de 1994 al 15 de febrero de 1995 en la Biblioteca Histórica de la E.T.S. Ingenieros de Minas en horario de 9,30 a 14,00 horas.

El Museo Histórico-Minero Don Felipe de Borbón y Grecia, perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, posee valiosas colecciones de muestras de minerales, fósiles, conchas, material arqueológico, instrumentos históricos de uso en la industria y en la enseñanza, maquetas, etc.

Son, en resumen, los testimonios acumulados durante más de dos siglos de intensa actividad docente e investigadora. Gran parte de estas colecciones ha permanecido ignorada por el público, e incluso por los propios ingenieros de Minas, hasta hoy.

El objetivo de la presente exposición es mostrar al aficionado y al estudioso algunos de los objetos arqueológicos e históricos, relacionados con las explotaciones mineras, que se conservan en la Escuela. También dar cuenta de las investigaciones arqueológico-mineras que el Museo lleva a cabo en la actualidad en diversos puntos de España. Algunas de las piezas expuestas tienen una extraordinaria calidad e ilustran la importancia de la minería en el desarrollo social de los distintos pueblos que han ocupado nuestra historia.

Simultáneamente con la exposición tendrá lugar un ciclo de conferencias, en las que se tratarán diversos temas de Paleontología, Arqueología e Historia de la Minería.

Los temas de la exposición serán los siguientes:

- El conjunto minero de El Milagro (Onís).
- Minería de yeso especular en Segóbriga (Cuenca).
- Utensilios mineros.
- Lampistería minera.
- La enseñanza de la minería.
- Minería iberoamericana.
- Instrumentos varios encontrados en contexto minero.

V CURSO ESPECIALIZADO EN INTERPRETACION DE PERFILES «SCHLUMBERGER» EN POZOS

A celebrar en Madrid, del 12 al 16 de Diciembre de 1994.

Introducción

La técnica de perfilar los pozos perforados para la búsqueda de hidrocarburos, agua, minerales, energía geotérmica y otros fines, se viene utilizando desde 1927, cuando los hermanos Schlumberger empezaron en Francia este tipo de investigaciones y medidas.

En el mismo período de tiempo se desarrollaron y se desarrollan teorías y algoritmos muy sofisticados para la interpretación de estos perfiles, con el intento de calcular típicos PARAMETROS PETROFISICOS, GEOLOGICOS, LITOLÓGICOS y de PRODUCCION DE FLUIDOS, y de ENERGIA de los eventuales yacimientos. En los últimos veinticinco años se han aplicado estos algoritmos al uso de las computadoras y se han construido unos PROGRAMAS que proporcionan resultados muy apreciados en las industrias del subsuelo.

Objetivos

La finalidad del curso es proporcionar a los asistentes los conocimientos y las técnicas necesarias para la interpretación de los perfiles en condiciones de:

- Formaciones litológicamente simples y limpias (sin arcilla).
- Formaciones complejas y limpias.
- Formaciones arcillosas.

Se interpretarán también unos perfiles de MEDIDA DE BUZAMIENTOS DE LAS FORMACIONES y de MEDIDA DE ESPECTROMETRIA INDUCIDA.

Participantes

El curso está dirigido a Geólogos, Ingenieros de Minas,

Geofísicos y Técnicos en general que tengan interés o necesidad de trabajo en la Evaluación de la Litología, Porosidad, Salinidad del Agua de Formación, Volumen de Arcilla, Buzamientos, Análisis Elemental y Espectroscopia de las Formaciones.

Metodología

El curso es EXCLUSIVAMENTE práctico y orientado a la FAMILIARIZACION con los Perfiles y los Cálculos relativos.

Es prácticamente necesario disponer de una CALCULADORA DE BOLSILLO. Cada participante recibirá:

- Una copia del CHARTS BOOK de Schlumberger (1991).
- TEXTO DEL CURSO (última edición 1990).
- Numerosos ejemplos de Perfiles de pozos de varios tipos.

Lugar y fechas

El Curso se desarrollará desde el lunes 12 al viernes 16 de diciembre en los locales de la Fundación Gómez-Pardo, Alenza, 1, 28003 Madrid, con el siguiente horario:

- Mañanas: 09,00 - 14,00
- Tardes: 16,00 - 18,00

Temario

- Interpretación de numerosos perfiles de pozo de petróleo, gas, agua.
- A lo largo de estos ejercicios se hablará, según las necesidades, de los conceptos básicos de Evaluación de los Perfiles y de las Herramientas correspondientes.

— Además se hablará extensamente de los Nuevos Métodos de Medidas:

- MAXI 500 SYSTEM (MEDIDA Y PROCESAMIENTO DE DATOS EN EL CAMION).
- DIPOLE SHEAR SONIC (MEDIDA DE LA ONDA DE CIZALLAMIENTO).
- STRATIGRAPHIC HIGH RESOLUTION DIMETER TOOL.
- AZIMUTHAL RESISTIVITY IMAGER TOOL.
- INDUCTION (28 CURVES) IMAGER TOOL.
- FORMATION MICROSCANNER TOOL.

- PROGRAMAS DE INTERPRETACION.
- ELAN (Elemental Analysis).
- MECHPRO (Mechanical Properties):

Profesorado

MASSIMO SPILA, Ingeniero Electrónico, Analista de perfiles, Ex Jefe de Mercado de SCHLUMBERGER (Europa Medit.), Ex Consultor de SCHLUMBERGER, GESSAL (Madrid) y ENRESA.

ACTO CONMEMORATIVO DEL V CENTENARIO DE AGRICOLA (1494-1555)

Organizado por la Asociación Nacional de Ingenieros de Minas de España y con la adhesión de la Asociación Hispano-Alemana de Ingenieros, Club Español de la Minería, Colegio Oficial de Geólogos, Dirección General de Minas, Embajada Alemana, Instituto de la Ingeniería de España y el Instituto Tecnológico Geominero de España.

Dicho acto se celebrará en Madrid el martes 20 de diciembre de 1994, a las 12,30 horas, en la E.T.S. de Ingenieros de Minas, desarrollándose el siguiente programa:

— 12-30-12,35. APERTURA. Ilmo. Sr. Dr. D. Pedro Fontanilla

Soriano, Presidente de la Asociación Nacional de Ingenieros de Minas de España.

- 12,35-12,55. MINERIA Y METALURGIA EN ESPAÑA DURANTE LA EDAD MODERNA. Dr. Octavio Puche Riart. E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid
- 12,55-13,15. LA APORTACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA DE AGRICOLA. Dr. Francisco Javier Ayala Carcedo. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- 13,15-13,20. CLAUSURA. Ilmo. Sr. Dr. D. Hermenegildo Mansilla Izquierdo, Director de la E.T.S. de Ingenieros de Minas (Universidad Politécnica de Madrid)

MAPA GEOLOGICO DE LA PROVINCIA DE LEON

Acaba de publicarse el Mapa Geológico de la Provincia de León a escala de 1:200.000 editado por el Instituto Tecnológico Geominero de España y la Diputación de León.

Para su elaboración se ha partido de la base proporcionada por las Hojas del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, 2.ª serie (MAGNA), elaboradas por el ITGE en la Provincia de León. Esta información cartográfica se ha complementado con otras aportaciones, provenientes de trabajos de investigación de recursos energéticos o rocas industriales, abordados por el propio ITGE o cedidos desinteresadamente por algunas compañías. Se ha contado asimismo con cartografías geológicas, publicadas o inéditas, procedentes de tesis doctorales de reciente realización, especialmente en el sector Norte del territorio leonés.

El desigual conocimiento e información disponible ha requerido, asimismo, la realización de diversas campañas de investigación, realizadas por el equipo de trabajo del ITGE de la oficina de Proyectos de León, tanto para profundizar en el conocimiento de áreas poco investigadas anterior-

mente, como para homogeneizar la información disponible de aquellas otras mejor conocidas.

El Mapa Geológico se ha elaborado atendiendo tanto a criterios litológicos como cronoestratigráficos, diferenciándose asimismo las unidades estratigráficas propias o características de cada una de las Zonas o Dominios Paleogeográficos-Estructurales en que se puede dividir el territorio de la Provincia de León.

La memoria explicativa se ha estructurado en los capítulos en que se divide cualquier memoria del Mapa Geológico de España (Introducción, Estratigrafía, Tectónica, Magmatismo y Recursos Naturales), diferenciándose la descripción de cada epígrafe en los grandes ciclos geológicos (precámbrico, hercínico y alpino) en que se puede estructurar la Historia Geológica de Iberia.

El Mapa Geológico de León con su correspondiente Memoria explicativa está ya a la venta en el Servicio de Publicaciones del ITGE así como en la Diputación de León.

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.

Se entregará paginado y mecanografiado a doble espacio por una sola cara y con amplios márgenes. Este texto se considerará definitivo, deberá venir leído por el autor y perfectamente puntuado y con las correcciones de las erratas de mecanografía que fuesen precisas. 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 y sean de autores extranjeros.

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:

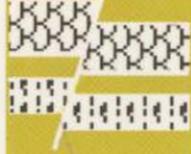
Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara
Instituto Tecnológico Geominero de España
Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

Instituto Tecnológico GeoMinero de España

Finalidad:

Investigación, Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica en Geología, Minería y Disciplinas conexas

GEOLOGIA Y GEOFISICA



MAPA GEOLOGICO NACIONAL (MAGNA)
ESTUDIOS GEOLOGICOS Y CARTOGRAFIA TEMATICA
GEOFISICA Y GEOLOGIA DEL SUBSUELO
GEOLOGIA MARINA (FONDOS MARINOS)
TELEDETECCION APLICADA

RECURSOS MINERALES



METALOGENIA Y CARTOGRAFIA METALOGENETICA
GEOQUIMICA BASICA Y APLICADA
YACIMIENTOS MINERALES
EVALUACION DE RESERVAS E INVENTARIO DE RECURSOS

AGUAS SUBTERRANEAS



CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA
PROTECCION DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS
EVALUACION Y CONTROL DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS
RECURSOS GEOTERMICOS

LABORATORIOS Y ENSAYOS



ANALISIS QUIMICOS Y MINERALOGICOS
ENSAYOS MINERALURGICOS Y GEOTECNICOS
CARACTERIZACION DE ROCAS MINERALES INDUSTRIALES
SONDEOS DE INVESTIGACION HIDROGEOLOGICA Y MINERA
ENSAYOS DE BOMBEO

INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS



FONDOS DOCUMENTALES Y BASES DE DATOS
SISTEMAS DE INFORMACION Y COMUNICACIONES
CATASTRO MINERO
PUBLICACIONES

INGENIERIA GEOAMBIENTAL



RIESGOS GEOLOGICOS
RESTAURACION DEL MEDIO AMBIENTE MINERO
GEOTECNIA Y GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA
MEDIO AMBIENTE Y ORDENACION DEL TERRITORIO

DESARROLLO MINERO



PROCESOS Y TECNOLOGIAS
SEGURIDAD MINERA
NORMATIVA
ESTUDIOS DE ECONOMIA MINERA

MUSEO GEOMINERO

Sede Central:

c/ Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID
Tel.: 441 65 00 – Fax: 442 62 16

Centro de Laboratorios:

c/ La Calera, 1 28760 TRES CANTOS (MADRID)
Tel.: 803 22 00



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO
SECRETARIA GENERAL DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

